

Die partielle Unterflurabsaugung zur Senkung der Emissionen und Verbesserung des Tierschutzes bei natürlich belüfteten Rinderställen

Projektfördernummer: 33789

Projektbeginn: 01.04.2018

Projektlaufzeit: 25 Monate

- Endbericht -

Braunschweig

30.04.2020

Autoren

M. Sc. Julian Hartje: julian.hartje@thuenen.de

Stefan Linke: stefan.linke@thuenen.de

Thünen-Institut für Agrartechnologie

Bundesallee 47

38116 Braunschweig

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Umweltrelevanz	3
3	Zielsetzung des Vorhabens	5
4	Literaturübersicht	9
5	Arbeitspakete	13
5.1	AP 1 (AT und NBS): Detaillierung des Lüftungskonzepts und Auswahl der Stallbasis	13
5.2	AP 2 (NBS): Erstellung einer Bauzeichnung	13
5.3	AP 3 (AT): Simulationsprogramm beschaffen und einrichten	14
5.3.1	Testsimulationen	14
5.3.2	Vernetzungsrichtlinien	17
5.4	AP 4 (AT): Übertragung der Geometrie aus der Bauzeichnung in das Simulationsprogramm	18
5.4.1	Geometrieerstellung	18
5.4.2	High-Performance Computing (HPC)	20
5.4.3	Auswahl eines Ventilators	21
5.4.4	Erstellung des Luftraumes und Vernetzung	22
5.4.5	Randbedingungen	27
5.4.6	Messkampagne an der Versuchsanlage in Braunschweig	30
5.5	AP 5 (AT): Berechnung der Luftströmung und der damit verbundenen Emissionsfrachten	33
5.5.1	Segment - erzwungene Konvektion	33
5.5.2	Gesamtstall	39
5.5.3	Segment - natürliche Konvektion	55
5.5.4	Fehlerbetrachtung	61
5.6	AP 6 (NBS): Kostenkalkulation	62
5.7	AP 7 (AT und NBS): Berichterstattung	62
5.7.1	Eurotier	62
5.7.2	ATB Summerschool	63
5.7.3	BTU-Tagung	63
5.7.4	Förderkreis Stallklima	64
5.7.5	Weitere Kurzvorträge und Ausstellung des Stallmodelles	64
6	Fazit	65
6.1	Ausblick	66
A	Anhang	73

Abbildungsverzeichnis

5	Arbeitspakete	13
Abb. 1	Evolutionsschritte 1 & 2 der Testsimulationen	15
Abb. 2	Evolutionsschritte 3 & 4 der Testsimulationen	15
Abb. 3	Detailgenauigkeit am Beispiel der Kuh in Abhängigkeit verschiedener Netzfeinheiten	17
Abb. 4	Darstellung des Skewness-Angles Θ , STAR-CCM+ (2018a)	18
Abb. 5	Stallgeometrie ohne Nebengebäude und Silos in STAR-CCM+	20
Abb. 6	Ausgewählter Teilbereich aus Gesamtstall für Berechnung	23
Abb. 7	Größe des Luftraumes um Stallausschnitt	23
Abb. 8	Darstellung des Netzes der ersten Geometrie	24
Abb. 9	Detailvergleich der geometrischen Modelle Basis 01 und Basis 02	24
Abb. 10	Darstellung des Netzes und der Rechenumgebung für den Gesamtstall	25
Abb. 11	Darstellung des Netzes für die Simulation der natürlichen Konvektion	26
Abb. 12	Darstellung der Verteilung der Einlässe (rot) und Auslässe (orange) für eine Anströmung senkrecht zum First ($\alpha = 0^\circ$) am Gesamtstall	28
Abb. 13	Blick in den Kuhstall mit befestigter Messeinrichtung	31
Abb. 14	Zeitlicher Verlauf von Innen- und Außentemperatur sowie der NH_3 - Konzentration über der Gülle	32
Abb. 15	Verlauf verschiedener Konvergenzparameter über den Iterationen von Basis 02	34
Abb. 16	Konturplot des Druckes im Mittelschnitt Basis 02	34
Abb. 17	Iso-Fläche für $v_x = 0 \text{ m/s}$ für Basis 02	35
Abb. 18	Schlierenbild mit Geschwindigkeitsverteilung im Unterflurbereich ($z =$ -0.55 m) Basis 02 in den Güllekanälen 1 - 4 (von links nach rechts)	36
Abb. 19	Darstellung der Stromlinien in den Güllekanälen Basis 02	36
Abb. 20	Vergleich der Stromlinien im Unterflurbereich für verschiedene Ventila- tordrehzahlen bei einer Anströmung von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$	37
Abb. 21	Vergleich der NH_3 -Konzentration im Stall ohne und mit partieller Un- terflurabsaugung bei einer Anströmung von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ und einem Ab- saugvolumenstrom von $\dot{V} = 226\,000 \text{ m}^3/\text{h}$	38
Abb. 22	Balkendiagramm zur Darstellung des relativen Ammoniakmassenstroms in die Umwelt eines frei belüfteten Rinderstalls mit und ohne partiel- ler Unterflurabsaugung bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten v_{10} und Absaugvolumenströmen	39
Abb. 23	Darstellung des Schlierenbildes und der Geschwindigkeitsverteilung auf dem gleichen y-Schnitt am Segment und dem Gesamtstall bei einer An- strömung von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ ohne partielle Unterflurabsaugung	40
Abb. 24	Darstellung des Schlierenbildes und der Geschwindigkeitsverteilung vom Segment und dem Gesamtstall bei einer Anströmung von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ ohne partielle Unterflurabsaugung auf einem Schnitt bei $z = 2 \text{ m}$	40

Abb. 25	Darstellung des Schlierenbildes und der Ammoniakverteilung auf einem y -Schnitt im Segment und dem Gesamtstall bei einer Anströmung von $v_{10} = 3\text{ m/s}$ ohne partielle Unterflurabsaugung	41
Abb. 26	Darstellung der Ammoniakverteilung auf einem Schnitt in der Austrittsebene des Stalls beim Segment (unten) und dem Gesamtstall (oben) bei einer Anströmung von $v_{10} = 3\text{ m/s}$ ohne partielle Unterflurabsaugung	41
Abb. 27	Balkendiagramm zum Vergleich der Minderung der Ammoniakemissionen durch die partielle Unterflurabsaugung zwischen einer Simulation des Segmentes und des Gesamtstalls bei einer Anströmung von $v_{10} = 3\text{ m/s}$ und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 151.000\text{ m}^3/\text{h}$ pro Kanal (entsprechend skaliert für das Segment)	42
Abb. 28	Definition der untersuchten Anströmwinkel am Gesamtstall	43
Abb. 29	Vergleich des Betrages der Geschwindigkeit auf einem Schnitt bei $z = 0,5\text{ m}$ bei variierendem Anströmwinkel am Gesamtstall bei einer Anströmung von $v_{10} = 3\text{ m/s}$ und einem Absaugvolumenstrom von $104.000\text{ m}^3/\text{h}$	44
Abb. 30	Vergleich der Ammoniakverteilung auf einem Schnitt bei $z = 0,5\text{ m}$ bei variierendem Anströmwinkel am Gesamtstall bei einer Anströmung von $v_{10} = 3\text{ m/s}$ und einem Absaugvolumenstrom von $104.000\text{ m}^3/\text{h}$	45
Abb. 31	Balkendiagramm zum Vergleich des Ammoniakmassenstroms in die Umwelt aus dem Gesamtstall für die verschiedenen Anströmwinkel α bei einer Anströmgeschwindigkeit von $v_{10} = 3\text{ m/s}$ und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 104.000\text{ m}^3/\text{h}$; Referenz: Gesamtstall ohne Absaugung, ohne Windschutznetze, $v_{10} = 3\text{ m/s}$, $\alpha = 0^\circ$	46
Abb. 32	Vergleich der Ammoniakverteilung auf einem Schnitt bei $z = 0,5\text{ m}$ bei einem Anströmwinkel von $\alpha = 45^\circ$ am Gesamtstall bei einer Anströmung von $v_{10} = 3\text{ m/s}$ und variierendem Absaugvolumenstrom	47
Abb. 33	Balkendiagramm zum Vergleich des Ammoniakmassenstroms in die Umwelt aus dem Gesamtstall für einen Anströmwinkel von $\alpha = 45^\circ$ bei einer Anströmgeschwindigkeit von $v_{10} = 3\text{ m/s}$ und variierendem Absaugvolumenstrom; Referenz: Gesamtstall ohne Absaugung, ohne Windschutznetze, $v_{10} = 3\text{ m/s}$, $\alpha = 0^\circ$	47
Abb. 34	Darstellung der drei Konfigurationen der Windschutznetze: ganz, oben und unten	49
Abb. 35	Darstellung des Schlierenbildes und der Geschwindigkeitsverteilung im Mittelschnitt des Gesamtstalls für die drei Konfigurationen der Windschutznetze bei einer Anströmung von $v_{10} = 10\text{ m/s}$ und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 104.000\text{ m}^3/\text{h}$	49
Abb. 36	Darstellung des Schlierenbildes und der Ammoniakverteilung im Mittelschnitt des Gesamtstalls für die drei Konfigurationen der Windschutznetze bei einer Anströmung von $v_{10} = 10\text{ m/s}$ und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 104.000\text{ m}^3/\text{h}$	50
Abb. 37	Balkendiagramm zum Vergleich des Ammoniakmassenstroms in die Umwelt aus dem Gesamtstall für die drei Konfigurationen der Windschutznetze bei einer Anströmung von $v_{10} = 10\text{ m/s}$ und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 104.000\text{ m}^3/\text{h}$; Referenz: Gesamtstall ohne Absaugung, ohne Windschutznetze, $v_{10} = 3\text{ m/s}$, $\alpha = 0^\circ$	50
Abb. 38	Konfiguration der Windschutznetze und Jalousien für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten	51

Abb. 39	Darstellung des Schlierenbildes und der Geschwindigkeitsverteilung im Mittelschnitt des Gesamtstalls für die drei optimierten Kombinationen der Windschutznetze und Jalousien bei einer variierenden Anströmung und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/h$	52
Abb. 40	Darstellung des Schlierenbildes und der Ammoniakverteilung im Mittelschnitt des Gesamtstalls für die drei optimierten Kombinationen der Windschutznetze und Jalousien bei einer variierenden Anströmung und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/h$	52
Abb. 41	Balkendiagramm zum Vergleich des Ammoniakmassenstroms in die Umwelt aus dem Gesamtstall für die drei für die Absaugung optimierten Kombinationen der Windschutznetze und Jalousien bei einer variierenden Anströmung und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/h$; Referenz: Gesamtstall ohne Absaugung, ohne Windschutznetze, $v_{10} = 3 \text{ m/s}$, $\alpha = 0^\circ$	53
Abb. 42	Darstellung der Stromlinien hinter der Seitenwandöffnung auf der windabgewandten Stallseite und der Geschwindigkeit in x-Richtung für die für die Absaugung optimierte Windschutznetzkonfiguration bei einer Anströmung von $v_{10} = 10 \text{ m/s}$ und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/h$	54
Abb. 43	Ergebnisse der Validierungsrechnung zur Sommersituation der natürlichen Konvektion	55
Abb. 44	Ergebnisse der Validierungsrechnung zur Wintersituation der natürlichen Konvektion	56
Abb. 45	Darstellung des Schlierenbildes und der Ammoniakverteilung für die Sommersituation ($T_0 = 30^\circ\text{C}$) der natürlichen Konvektion nach 600 s ohne (links) und nach weiteren 600 s mit (rechts) partieller Unterflurabsaugung ($\dot{V} = 82.000 \text{ m}^3/h$)	57
Abb. 46	Darstellung des Schlierenbildes und der Geschwindigkeitsverteilung für die Sommersituation ($T_0 = 30^\circ\text{C}$) der natürlichen Konvektion nach 600 s ohne (links) und nach weiteren 600 s mit (rechts) partieller Unterflurabsaugung ($\dot{V} = 82.000 \text{ m}^3/h$)	57
Abb. 47	Darstellung des Schlierenbildes und der Temperaturverteilung für die Sommersituation ($T_0 = 30^\circ\text{C}$) der natürlichen Konvektion nach 600 s ohne (links) und nach weiteren 600 s mit (rechts) partieller Unterflurabsaugung ($\dot{V} = 82.000 \text{ m}^3/h$)	58
Abb. 48	Darstellung des Schlierenbildes und der Ammoniakverteilung für die Wintersituation ($T_0 = 5^\circ\text{C}$) der natürlichen Konvektion nach 600 s ohne (links) und nach weiteren 600 s mit (rechts) partieller Unterflurabsaugung ($\dot{V} = 82.000 \text{ m}^3/h$)	58
Abb. 49	Darstellung des Schlierenbildes und der Geschwindigkeitsverteilung für die Wintersituation ($T_0 = 5^\circ\text{C}$) der natürlichen Konvektion nach 600 s ohne (links) und nach weiteren 600 s mit (rechts) partieller Unterflurabsaugung ($\dot{V} = 82.000 \text{ m}^3/h$)	59
Abb. 50	Darstellung des Schlierenbildes und der Temperaturverteilung für die Wintersituation ($T_0 = 5^\circ\text{C}$) der natürlichen Konvektion nach 600 s ohne (links) und nach weiteren 600 s mit (rechts) partieller Unterflurabsaugung ($\dot{V} = 82.000 \text{ m}^3/h$)	60

Abb. 51	Balkendiagramm zum Vergleich des Ammoniakmassenstroms in die Umwelt aus dem Gesamtstall für eine Sommer- ($T_0 = 30^\circ C$) und eine Wintersituation ($T_0 = 5^\circ C$) ohne und mit partieller Unterflurabsaugung mit einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 82\,000\,m^3/h$	60
Abb. 52	Blick auf das Stallmodell, das bei der EuroTier ausgestellt wurde	63

A Anhang **73**

Abb. 53	Grundriss und Schnitt Stallgebäude Version 01	73
Abb. 54	Grundriss und Schnitt Unterflurabsaugung Version 01	74
Abb. 55	Grundriss und Schnitt Stallgebäude Version 08	75
Abb. 56	Grundriss und Schnitt Unterflurabsaugung Version 08	76
Abb. 57	Seitenansichten Stallgebäude Version 08	77
Abb. 58	Ansicht Futtermittelsilos Version 08	77
Abb. 59	Schnitt Technikgebäude Version 08	78
Abb. 60	Testmodell für Ventilatormodellierung	78
Abb. 61	Darstellung der Position der Volumetric Controls in der ersten Basisrechnung	78
Abb. 62	Box zur Aufbewahrung des INNOVA 1302 mit angehängtem Polytron C300 zur NH_3 -Messung der Stallluft	79
Abb. 63	Edelstahlrohr im Unterflurbereich mit integriertem Schlauch zur Messung der NH_3 -Konzentration über der Gülle	79
Abb. 64	Messposition der CO_2 -Konzentration in der Luft im Bereich des Kraftfutterautomaten	79
Abb. 65	Messposition für Lufttemperatur und -feuchte sowie CO_2 -Konzentration im Außenbereich des Stalles	80
Abb. 66	Poster von der EuroTier zur Erläuterung des Projektes	81
Abb. 67	Handout BTU-Tagung Rückseite	82
Abb. 68	Zeitlicher Verlauf der NH_3 -Konzentration in der Stallluft in etwa 3 m Höhe	83
Abb. 69	Zeitlicher Verlauf der CO_2 -Konzentration innerhalb und außerhalb des Stalles sowie über der Gülle	83
Abb. 70	Zeitlicher Verlauf der relativen Feuchte innerhalb und außerhalb des Stalles	83
Abb. 71	Zeitlicher Verlauf der CH_4 -, N_2O - sowie der Wasserdampfkonzentration über der Gülle	83
Abb. 72	Kostenkalkulation für Stall ohne partielle Unterflurabsaugung, Blatt 1 .	84
Abb. 73	Kostenkalkulation für Stall ohne partielle Unterflurabsaugung, Blatt 2 .	85
Abb. 74	Kostenkalkulation für Stall ohne partielle Unterflurabsaugung, Blatt 3 .	86
Abb. 75	Kostenkalkulation für Stall mit partieller Unterflurabsaugung, Blatt 1 . .	87
Abb. 76	Kostenkalkulation für Stall mit partieller Unterflurabsaugung, Blatt 2 . .	88
Abb. 77	Kostenkalkulation für Stall mit partieller Unterflurabsaugung, Blatt 3 . .	89
Abb. 78	Kostenkalkulation für Stall mit partieller Unterflurabsaugung, Blatt 4 . .	90

Tabellenverzeichnis

5	Arbeitspakete	13
Tab. 1	Übersicht der ausgewählten numerischen Modelle zur weiteren Berechnung im Projekt	17
Tab. 2	Übersicht über die Schritte zur Geometrieerstellung eines Spaltenbodenelementes	19
Tab. 3	Resultierender Massenstrom an den Ventilatoren der Absaugung und des Filterturms in Abhängigkeit vom abgesaugten Volumenstrom pro Kanal bei einer Umgebungstemperatur von $T_0 = 20^\circ C$	29
Tab. 4	Übersicht über die verwendete Messtechnik zur Messung verschiedener Parameter im Kuhstall	32
Tab. 5	Auflistung verschiedener Zuluftvolumenströme in den Stall und den daraus resultierenden Luftwechselraten AER bei verschiedenen Randbedingungen	53
Tab. 6	Gegenüberstellung der resultierenden Volumenströme aus dem Stall heraus unter dem Einfluss einer Auftriebsströmung zu verschiedenen Jahreszeiten in Abhängigkeit der partiellen Unterflurabsaugung mit einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 84.000 m^3/h$ nach jeweils 600 s	59

Abkürzungs- und Variablenverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AER	air exchange rate
AP	Arbeitspaket
AT	Thünen-Institut für Agrartechnologie
ATB	Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bio- ökonomie
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Natur- schutz, Bau und Reaktorsicherheit
CAD	computer-aided design
CPU	central processing unit
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V.
EN	Europäische Norm
GB	Gigabyte
GV	Großvieheinheit
HLRN	Norddeutscher Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen
HPC	High-Performance-Computing
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
LDA	Laser-Doppler-Anemometer
LES	Large Eddy Simulation
NBS	Norddeutsche Bauernsiedlung GmbH
NEC	national emission ceilings
NERC	national emission reduction commitments
NPL	Norddeutsche Parallelrechner- Leistungseinheit
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
TierSchNutzV	Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung
UBA	Umwelt Bundesamt
UIP	Umweltinnovationsprogramm

Variable	Symbol	Einheit
Anströmwinkel	α	°
Avogadro-Konstante	N_A	mol^{-1}
Breite	b	m
Drehzahl	n	rpm
Druck	p	Pa
Fläche	A	m^2
Gaskonzentration von Gas i	C_i	kg/m^3
Gaskonzentration von Gas i	N_i	ppm
Geschwindigkeit	v	m/s

Geschwindigkeit in 10 m Höhe	v_{10}	m/s
Höhe	h	m
Länge	l	m
Massenstrom	\dot{m}	$g/h, kg/s$
molare Masse von Stoff i	M_i	kg/mol
molares Volumen	V_m	m^3/mol
Reynoldszahl	Re	
Skewness-Angle	Θ	$^\circ$
Volumenstrom	\dot{V}	m^3/h
Volumen eines Stoffes i	V_i	m^3

1. Zusammenfassung

Versauerung und Stickstoffanreicherungen im Erdreich und in Gewässern sind Belastungen der Ökosysteme, die auf Ammoniakemissionen zurückgeführt werden können. Durch die Vorgabe des Europäischen Rates, diese Ammoniakemissionen zu verringern, wächst der Druck auf Deutschland, Reduktionspotentiale zu schaffen.

Die Landwirtschaft ist die größte Quelle der Emission von Ammoniak. Besonders die Rinderhaltung tritt im landwirtschaftlichen Bereich in den Fokus. Ihr wird ein Anteil von gut der Hälfte der Freisetzung von Ammoniak zugeschrieben. Mehr als ein Drittel davon entfallen auf den Stall und die Güllelagerung.

Eine Möglichkeit Emissionen im Bereich des Rinderstalls zu reduzieren, bietet die partielle Unterflurabsaugung. Die hohen Ammoniakkonzentrationen im Güllebereich werden dabei unter dem perforierten Boden abgesaugt und einem Abluftwäscher zugeführt. Da die windinduzierte natürliche Belüftung im Oberflurbereich weiterhin stattfindet, dabei aber die Ammoniakbelastung reduziert ist, werden die Emissionen gesenkt und Tierschutzaspekte berücksichtigt.

In Zusammenarbeit mit der Norddeutschen Bauernsiedlung GmbH (NBS) wurde ein Rinderstall für 255 Tiere entworfen, in den eine partielle Unterflurabsaugung integriert worden ist. Dieser Stall wurde in das Simulationsprogramm STAR-CCM+ der Firma Siemens PLM übertragen, um die Wirkungsweise der Absaugung untersuchen und gegebenenfalls optimieren zu können.

Dafür wurden zunächst Testsimulationen an einer reduzierten Geometrie vorgenommen, in denen sowohl die Vernetzung untersucht als auch die Auswahl und Validierung der numerischen Modelle durchgeführt worden ist. Diese Erkenntnisse wurden dann auf die erzeugte Stallgeometrie übertragen. Aufgrund geringer Rechnerkapazitäten konnte erst nur ein Teilsegment des Stalls untersucht werden. Hier hat sich gezeigt, dass die Vernetzungsrichtlinien aus den Testsimulationen nicht auf die Stallgeometrie übertragbar waren. Eine erneute Untersuchung und Variation dieser Richtlinien am Teilsegment des Stalls führten schließlich zu konvergierten und physikalisch richtigen Ergebnissen. Im weiteren Projektverlauf konnte die zur Verfügung stehende Rechnerkapazität ausgebaut werden. Zunächst konnten Ressourcen des Norddeutschen Verbunds für Hoch- und Höchstleistungsrechnen (HLRN) genutzt werden. Nach Ablauf der Lizenzen dort liefen die Simulationen auf dem in der Zwischenzeit aufgebauten Großrechner am Thünen-Standort in Braunschweig.

Durch die erhöhte Rechenleistung konnten nun weitere Varianten und Konfigurationen simuliert werden. Ein Hauptpunkt stellte dabei die Simulation des gesamten Stalls und dessen Vergleich zu den Rechnungen am Segment dar. An diesem Modell wurde außerdem die Richtung der Anströmung variiert, um den Einfluss auf die Ammoniakemissionen und die Möglichkeiten der Reduzierung durch die Unterflurabsaugung zu erkennen. Darüber hinaus beleuchteten weitere Untersuchungen den Einfluss von Jalousien und Windschutznetzen auf das Strömungsgeschehen in und um den Stall. Eine Betrachtung von Schwachwindtagen ohne natürliche Durchströmung des Stalls schloss die Untersuchungen ab.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass durch die partielle Unterflurabsaugung der Ammoniakmassenstrom aus dem Stall in die Umgebung gesenkt werden kann. Dies gilt auch für eine abweichende Anströmung von der Hauptwindrichtung. Hier bietet eine lokale Regelung der Ventilatoren im Unterflurbereich die Möglichkeit, auf entstehende Rezirkulationszonen im Oberflurbereich reagieren zu können, um die Emissionen aus dem Stall noch weiter zu senken.

Durch den Einsatz der Windschutznetze und Jalousien entsteht eine bessere Beherrschbarkeit der Strömung im Stallinneren. Hierdurch kann auch die Unterflurabsaugung besser arbeiten, sodass die Emissionen im Vergleich zu einem Stall ohne Maßnahmen zur Windbrechung an den Seitenwandöffnungen niedriger sind.

Auch bei Schwachwindlagen kann die partielle Unterflurabsaugung die Ammoniakemissionen sowohl im Sommer als auch im Winter bei bereits geringen Absaugvolumenströmen signifikant senken. Aufgrund des niedrigen Volumenstroms war bei dieser Konfiguration keine Aussage über das Potential zur Wärmeabfuhr durch die partielle Unterflurabsaugung möglich. Es wird aber erwartet, dass mit einer Steigerung des Volumenstroms auch eine deutliche Abfuhr der Wärme aus dem Stallinneren vor allem im Sommer erreicht werden kann. Dies ist jedoch auch abhängig von der nachströmenden Umgebungstemperatur. Nicht betrachtet wurde in diesem Zusammenhang die Verteilung und mögliche Reduzierung von Luftfeuchtigkeit.

Zur Einordnung der Ergebnisse muss bedacht werden, dass sie nur das theoretische Potential der Unterflurabsaugung darstellen. In der Realität müssen die numerischen Resultate durch Messungen in verschiedenen Testperioden bestätigt werden. Ferner gilt es stets einen Kompromiss zwischen Performance der Absaugung, Wäscherbelastung und Energieverbrauch zu finden.

Zur Validierung der gewählten Randbedingung für die Ammoniakkonzentration an der Gülleoberfläche wurde eine Messkampagne an der Versuchsstation auf dem Gelände in Braunschweig durchgeführt. Diese bestätigte die Annahme von 20 ppm Ammoniak auf der Gülleoberfläche.

Auf der Messe EuroTier in Hannover konnte das Projekt erstmals einer breiteren Öffentlichkeit vorgestellt werden. Außerdem wurden erste Kontakte zu Firmen im Bereich der Abluftreinigung in der Tierhaltung geknüpft. Auf der Summerschool der ATB in Potsdam wurde einem Kreis aus internationalen Nachwuchswissenschaftlern Mitte September 2019 ein Poster zum Projekt vorgestellt. Darüber hinaus konnte die Arbeitsgruppe eine Woche später bei der BTU-Konferenz in Bonn erneut ein Poster präsentieren. Es folgte ein Vortrag über die partielle Unterflurabsaugung beim Förderkreis Stallklima Anfang Oktober 2019 in Österreich. Weitere kleinere Präsentationen und Vorstellungen des Projektes fanden bei Veranstaltungen und Führungen von Besuchergruppen am Thünen-Institut für Agrartechnologie in Braunschweig statt.

2. Umweltrelevanz

Versauerung und Stickstoffanreicherungen im Erdreich und in Gewässern sind Belastungen der Ökosysteme, die auf Ammoniak zurückgeführt werden können. Ammoniak emittiert als Gas in die Atmosphäre, verbleibt dort nur kurz und lagert sich als trockene Deposition im Umfeld des Emittenten ab. Seine Umwandlungsprodukte Ammonium und Ammoniumsulfate hingegen werden weit durch die Atmosphäre getragen, waschen durch Regen- oder Schneefall aus und schlagen sich als nasse Deposition nieder.

Im Gegensatz zur NEC-Richtlinie 2001/81/EG (2001), die nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe festlegt, stehen in der jetzt gültigen NERC-Richtlinie 2016/2284 (2016) konkrete Prozentangaben, um die nationale Emissionen bestimmter Luftschadstoffe zu verringern sind. Für den Luftschadstoff Ammoniak bedeutet das in Deutschland eine Reduktion um 5 % in jedem Jahr zwischen 2020 bis 2029 und ab 2030 um 29 %, gemessen am Stand von 2005.

Die Ammoniakemissionen in Deutschland betragen laut Umweltbundesamt (UBA (2019)) im Jahr 2005 640.000 t und stiegen bis 2017 leicht an (673.000 t). Die Landwirtschaft ist dabei mit circa 95 % die größte Quelle der Emission von Ammoniak. Besonders die Rinderhaltung tritt im landwirtschaftlichen Bereich in den Fokus. Ihr wird ein Anteil von 52 % der Freisetzung von Ammoniak zugeschrieben (UBA (2014)). Laut Rösemann et al. (2019) entfielen im Jahr 2017 von den NH_3 -Emissionen aus der Rinderhaltung 32,2 % auf den Stall und 9,0 % auf die Güllelagerung. Die Ausbringung der Gülle (56,4 %) und die Weidehaltung der Tiere (2,4 %) sind die weiteren Verursacher der Ammoniakemissionen in der Rinderhaltung.

In Deutschland wurden laut statistischem Bundesamt im Mai 2019 11.763.433 Rinder in 136.091 Betrieben gehalten (Statistisches Bundesamt (2019)). Nur 27 % dieser Betriebe haben Bestandszahlen ≥ 100 Tiere. In diesen wenigen Betrieben wird aber mit 75 % der Großteil aller Rinder gehalten. Dies zeigt, dass es einen allgemeinen Trend zur Vergrößerung der Stallanlagen gibt (siehe auch Lindena et al. (2018)). Da technische Maßnahmen zur Emissionsreduktion eine gewisse Betriebsgröße und ein standardisiertes Management voraussetzen, sind somit auch in der Rinderhaltung und der damit verbundenen Güllelagerung die besten Möglichkeiten gegeben, um mit intelligenter Lüftungstechnik und anschließender Nachbehandlung der Abluft auf die Emission von Ammoniak einzuwirken. Im Bereich des Rinderstalls gibt es ein theoretisches Einsparpotential von ca. 144.000 t Ammoniak, wenn die Emissionen aus dem Stall und der Güllelagerung auf 0 gesenkt werden könnten (Werte von oben für das Jahr 2017). Mit Blick auf die Gesamtemissionen sind das ca. 1/5 der Ammoniakfrachten, die aus der Betrachtung der Emissionshöchstmengen herausfallen würden. Der Einbau von partiellen Unterflurabsaugungen in Rinderställen könnte Deutschland näher an das Erreichen der durch die NERC-Richtlinie geforderten Ammoniakemissionsreduzierung heranbringen.

Bei Nichterfüllung dieser Vorgaben sind hohe Strafzahlungen vorgesehen. Die Bundesregierung sollte in Betracht ziehen, den Landwirten, die bereit sind durch den Einbau technischer Maßnahmen wie der partiellen Unterflurabsaugung mit anschließender Abluftreinigung die Ammoniakfrachten zu senken, die eingesparten Strafzahlungen in Form von Zuschüssen zu den Baukosten solcher emissionsarmen Ställe zur Verfügung zu stellen. In der Bevölkerung gibt es ein großes Bestreben nach mehr Nachhaltigkeit, insbesondere in der Landwirtschaft (vgl. u. a. BMEL (2019)). Dies schließt nicht nur allein den Umweltschutz ein, sondern richtet auch ein großes Augenmerk des Verbrauchers auf den

Tierschutz. So sollen die Ställe Stoffkreisläufe, zum Beispiel die des Stickstoffs, schließen und nur niedrige Emissionen in die Umwelt freisetzen. Darüber hinaus sollen sie aber auch die Bedürfnisse der Tiere nach unter anderem ausreichend Platz, Licht und frischer Luft erfüllen. Ein Zielkonflikt, den es zu lösen gilt, um einem Stall aus Sicht des Verbrauches mehr Akzeptanz zu verschaffen. Ein Rinderstall mit partieller Unterflurabsaugung wäre durch seine offene Bauweise weiterhin Licht und Luft durchflutet, würde aber durch die technischen Maßnahmen weniger luftfremde Stoffe in die Umwelt freisetzen als ein Stall ohne diese Technik.

3. Zielsetzung des Vorhabens

Die Arbeiten des Thünen-Instituts für Agrartechnologie konzentrieren sich auf die Bewertung und Weiterentwicklung von Technologien und Produktionsmethoden für eine nachhaltige Agrarproduktion. Im Forschungsbereich „Umwelttechnologie Tier“ werden Technologien zur Minderung und Vermeidung von Emissionen entwickelt und getestet. Dabei wird beachtet, dass alle technischen Maßnahmen nach Möglichkeit auch die Tiergesundheit fördern, um den Zielkonflikt zwischen Umwelt- und Tierschutz aufzulösen. Es bestehen zudem langjährige Erfahrungen in der computergestützten Modellierung und Messung von Emissionen und Immissionen von Gasen, Partikeln und Bioaerosolen. Dies zeigen verschiedene Veröffentlichungen (Hahne et al. (2016), Stolz et al. (2014), Linke et al. (2012)), in denen unter anderem mit Hilfe der numerischen Simulation die Emissionen aus verschiedenen Haltungformen für unterschiedliche Tierarten, wie beispielsweise einen Boxenlaufstall für Rinder (Krause und Linke (2011)), berechnet wurden.

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, sind durch Krause (2012) festgelegt. Ein Beispiel, wie intelligente Lüftungstechnik und anschließende Abluftreinigung emissionsmindernd wirken kann, wird durch Krause et al. (2010) beschrieben. Dabei wird in einem Mastschweinstall der Bereich unter dem Spaltenboden partiell abgesaugt und diese mit Ammoniak hoch kontaminierte Luft einem Abluftwäscher zugeführt. Der Volumenstrom des Unterfluranteils hat mindestens die nach DIN 18910-1:2004-11 (2004) berechnete Winterluftfrate. Er steigt bis auf 30 % Gesamtluftanteil im Sommerluftbetrieb an. Der unterflur abgesaugte Luftvolumenstrom hält die Druckdifferenz im Bereich des Spaltenbodens nahe Null und verhindert so ein Eindringen hoher Ammoniakkonzentrationen in den Oberflurbereich. Dies wird auch dadurch erreicht, dass nicht einzelne Punktsenken, sprich runde Absaugöffnungen, zum Einsatz kommen, sondern die Abluft über eine Liniensenke, also einen schlitzförmigen Kanal, abgesaugt wird. Die Luftströmung wird gleichmäßiger, gerichteter und turbulenzärmer, was zusätzlich zur Emissionsminderung beiträgt.

Im vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) über das Umweltinnovationsprogramm (UIP) geförderten Projekt „Verfahren zur Be- und Entlüftung eines Maststalls mit Frischluftzufuhr über Deckenkanäle“ wurde ein Pilotstall realisiert. Die am Institut über die Numerik erarbeiteten Erkenntnisse wurden dabei beim Bau des Stalls verwirklicht. Mußlick et al. (2015) verfassten dazu einen Abschlussbericht. Durch intelligente Stalllüftung können Emissionen gesenkt und der Tierschutz verbessert werden. Dies haben erste Untersuchungen mit partiellen Unterflurabsaugungen in Schweinemastanlagen gezeigt. Bei der Rinderhaltung fallen pro Großvieheinheit (GV) noch höhere Ammoniakfrachten als in der Schweinemast an (Eurich-Menden (2012)). Diese werden bisher ungefiltert in die Umwelt getragen, wohingegen in der Schweinemast der Filtereinsatz Stand der Technik ist. Die partielle Unterflurabsaugung kann beim Bau von Rinderställen vorgesehen werden und somit Zugriff auf die Ammoniakfrachten ermöglichen.

In modernen Stallanlagen für die Rinderhaltung finden wie bei der Haltung von Schweinen perforierte Böden Anwendung, selbst in der ökologischen Rinderhaltung. Allerdings sind die gesetzlichen Vorgaben für den Einsatz von solchen Böden bei Schweinen und Rindern unterschiedlich und werden in der Praxis auch unterschiedlich umgesetzt. So ist laut

Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (2016) bei Mastschweinen ein Vollspaltenboden möglich und auch als eine weit verbreitete Haltungsform etabliert. Für Rinder existiert in der TierSchNutzV nur ein Abschnitt mit Anforderungen an das Halten von Kälbern. Theoretisch ist das Halten von Rindern auf Vollspalten möglich, findet in konventionellen Betrieben aber nur noch sehr selten Anwendung.

In der ökologischen Rinderhaltung greift die EG-Öko-Basisverordnung Nr. 834 (2007) mit den dazugehörigen Durchführungsvorschriften in der EG-Verordnung Nr. 889 (2008). Sie fordern einen ständigen Zugang zu Freigelände (Auslauf). Dieser kann als perforierter Boden ausgeführt werden. Für den Stall an sich wird die Ausführung der Hälfte der Stallfläche als Boden mit Spalten zugelassen. Somit ermöglicht auch die ökologische Haltungsform den Zugriff der partiellen Unterflurabsaugung auf die Emissionen aus dem Güllekeller.

Modern und tiergerecht ist der bei Milchkühen verwendete Boxenlaufstall. In dieser Haltungsform können sich die Tiere frei bewegen. Der Liegebereich ist hier eingestreut, der Fress-, Lauf- und Melkbereich ist oftmals mit perforierten Böden ausgelegt, um Kot und Harn in den Güllekeller abzuführen.

In Boxenlaufställen werden die Tiere beispielsweise durch zwei an den Außenwänden liegende Futtertische versorgt. Zwischen den Futtertischen sind die Liegeboxen in Zweierreihen auf der Stallbreite verteilt. Die Laufgänge können mit Spaltenböden nach DIN EN 12737:2008-02 (2008) ausgelegt sein. Durch sie hindurch werden die Fäkalien der Tiere in den Güllekeller abgeführt und gelagert. Bei der Reinigung der Spaltenböden ist der Einsatz eines Schiebers oder Reinigungsroboters, auch bei der partiellen Unterflurabsaugung, möglich.

Bei einer möglichen technischen Ausführung, die es im Projekt zu überprüfen gilt, wird im Bereich unter dem perforierten Boden ein Abluftkanal installiert, um Zugriff auf die Unterflurluft des Stalls zu bekommen. Bei fehlender Unterflurabsaugung taucht die Strömung durch die Spalten im Boden in den Güllekeller ein, fließt über die Gülleoberfläche und strömt mit Ammoniak angereichert wieder in den Oberflurbereich zurück. Im Stall mit partieller Unterflurabsaugung wird die Strömung aktiv durch den Abluftkanal im Unterflurbereich gehalten.

Der Kanal muss über die ganze Tiefe des Stalls gleichmäßig wirken. Dazu ist der Abluftkanal über die Stalltiefe bau- und somit auch lufttechnisch in mehrere gleich lange Segmente unterteilt, in die Absaugschlitze eingelassen sind. Über diese Schlitze wird die Luft aus dem Zwischenraum von Spaltenboden und Gülleoberfläche in den Kanal abgesaugt. Das Absaugen der Luft, die hohe Ammoniakkonzentrationen mit sich führt, erfolgt somit als Liniensenke mit den bereits beschriebenen Vorteilen.

Zu jedem Segment gehört eine Luftregleinheit. Sie besteht aus Regelklappen und Messventilator. Der Istwert des abgesaugten Luftvolumenstromes jedes einzelnen Segmentes wird über einen Messventilator erfasst und an den Klimacomputer übermittelt. Durch Sollwertabgleich kann den jeweiligen Regelklappen eine Stellung zugewiesen werden, die die geförderte Luftmenge aller Einzelsegmente identisch hält. Ein gleichmäßiges Absaugen über die ganze Stalltiefe ist gewährleistet.

Im Abluftkanal wird die Fortluft aus den einzelnen Segmenten gebündelt und einem Abluftwäscher, der die Vorgaben der DLG (2015) erfüllt, zugeführt. Die Bereitstellung des erforderlichen Unterdruckes bzw. Volumenstromes erfolgt über eine Zentralabsaugung, die auf den Stirnseiten des Stalls angeordnet ist. Ein Verbauen der Hauptanströmrichtung ist zu vermeiden, um das natürliche Durchströmen des Stalls durch den Wind nicht zu beeinträchtigen.

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. Strömungen laufen immer vom Bereich höheren Druckes zum Bereich niedrigeren Druckes. So wird verhindert, dass die Tiere hohe Ammoniakkonzentrationen einatmen und große Ammoniakfrachten in die Umwelt getragen werden. Durch mehrere Differenzdruckmessungen zwischen Ober- und Unterflurbereich kann dies gewährleistet werden, wenn die Daten auf einem zentralen Stallklimacomputer verrechnet werden und die Zentralabsaugung für den erforderlichen Unterdruck sorgt. Dies erfolgt, dank der Luftregeleinheiten, Segment für Segment über die gesamte Tiefe des Rinderstalls.

Es wird erwartet, dass sich ein positiver Nebeneffekt der partiellen Unterflurabsaugung an warmen, windarmen Tagen zeigt. Bei diesen Wetterverhältnissen ist es ein großes Problem, eine Luftzirkulation im Stall zu entfachen, um die Wärmelast von den Rindern zu nehmen. Das Problem wird gelöst, indem eine im Stall positionierte Klimastation Daten über Temperatur und Feuchte, aber auch die Luftgeschwindigkeit auf Tierhöhe an den Stallklimacomputer sendet. Der Computer fährt beim Über- bzw. Unterschreiten von festgelegten Grenzwerten die Zentralabsaugung auf eine Luftleistung, die im Stall zu einer Luftumwälzung und damit zu einer Wärmeabfuhr führt. Die partielle Unterflurabsaugung soll so für eine stetige, homogene Durchlüftung des Stalls an Tagen mit wenig bis keiner natürlichen Querlüftung sorgen und die Klimaparameter in einem Wertebereich halten, in dem sich die Tiere im Stall wohlfühlen.

Von der DLG zertifizierte Abluftreinigungsanlagen reduzieren Ammoniakemissionen in der Schweinehaltung mindestens zu 70 %. Sollte auch in der Rinderhaltung die Filtertechnik Stand der Technik werden und gleiche Reinigungsleistungen erzielt werden, könnten gesetzliche Vorgaben, die die Reduktion von Ammoniakemissionen fordern, leichter erreicht werden. Analog zu der Schweinehaltung sollte dann aber auch durch Erlässe ein Zwang zur Verwendung solcher Techniken in der Rinderhaltung geregelt sein.

In vielen Fällen ist die Vorbelastung der Emissionen eines bestehenden landwirtschaftlichen Betriebes zu hoch und somit die durch eine Ausbreitungsrechnung ermittelten Abstände zu Wohngebieten oder schützenswerter Ökosysteme zu gering um eine Erweiterung der Tierhaltung um einen neuen Rinderstall zu realisieren. Landwirten, die den Neubau eines Rinderstalls planen, wird durch das Stallkonzept eine Möglichkeit aufgezeigt, die Emissionen aus ihrem Betrieb in die Umwelt zu reduzieren. Das Konzept kann bei diesen Genehmigungsverfahren dazu führen, dass ein Rinderstall aufgrund seiner niedrigen Emissionsfrachten eine Baugenehmigung erhält, die er ohne partielle Unterflurabsaugung mit anschließender Abluftreinigung nicht bekommen würde.

Viele Landwirte wollen dem Wunsch des Verbrauchers nachkommen und dem Schutz der in ihrem Stall lebenden Tiere mehr Rechnung tragen. Auch dies wird durch die Verwendung der partiellen Unterflurabsaugung realisiert, werden doch viele luftfremde Stoffe im Unterflurbereich des Stalls gehalten und gelangen so nicht in den Atembereich der Tiere. Zusätzlich wird durch das stetige Erzeugen eines Unterdrucks im Stall für einen Luftaustausch auch bei windarmen Verhältnissen gesorgt. Der Hitzestress der Rinder kann vermindert werden, da die Wärmelast durch den mechanisch erzeugten Luftstrom von den Tieren abgeführt wird.

Die partielle Unterflurabsaugung mit anschließender Abluftreinigung kann den Zielkonflikt zwischen mehr Umweltschutz bei gleichzeitiger Steigerung des Tierschutzes im Bereich der Rinderhaltung lösen und so einen großen Schritt in Richtung einer nachhaltigen Landwirtschaft ermöglichen.

Kernstück bei der Lösung des Problems den Nachweis der Emissionsminderung und die Steigerung der Luftqualität bei einem Rinderstall mit partieller Unterflurabsaugung zu erbringen, ist das kommerzielle numerische Strömungssimulationsprogramm STAR-CCM+

der Firma Siemens PLM. Es ist in der Lage komplexe Strömungsvorgänge zu berechnen und dabei skalare Größen wie die Ausbreitung von Ammoniak mit zu berechnen und darzustellen (STAR-CCM+ (2018a)). Dies gilt sowohl für Strömungen in Gebäuden als auch bei Außenströmungen sowie einer Kombination aus beidem, so wie es im Projekt der Fall ist. Im Strömungssimulationsprogramm sind sowohl ein Vernetzer, der eine Geometrie auf ein Rechengitter transferiert, als auch ein umfangreiches Portfolio an Gleichungslösern und Turbulenzmodellen enthalten. Der Vernetzer arbeitet vollautomatisch und kann den Feinheitsgrad des Rechengitters an die zu erwartenden Gradienten anpassen. Mit Hilfe der Gleichungslöser können transiente als auch stationäre Problemstellungen berechnet werden. Bei den numerischen Modellen kann vom RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) Modell bis hin zur Large Eddy Simulation (LES) für jeden Anwendungsfall das geeignete Modell gewählt werden. Ein umfangreiches Postprocessing-Modul ermöglicht die Aufbereitung der bei der numerischen Simulation entstandenen großen Datenmengen in eine verständliche Darstellungsform wie Videos, Grafiken oder auch Tabellen.

Im Projekt soll, nach den beschriebenen Vorgaben, eine umsetzbare Bauzeichnung, die auf der Basis eines bereits bestehenden Rinderstalls um eine partielle Unterflurabsaugung mit anschließender Abluftreinigung ergänzt wurde, erstellt werden. Anhand dieses Bauplans werden die Kosten für den Stallbau und die darin enthaltenen Mehrkosten für den Einbau der erforderlichen raumlufttechnischen Anlage ermittelt. Die Geometrie der Zeichnung wird in ein Computermodell übertragen. Mit Hilfe der numerischen Simulation werden die Luftwege überprüft und das Emissionsminderungspotential berechnet. Die Ergebnisse werden zusammengefasst und publiziert.

4. Literaturübersicht

In diesem Kapitel soll eine kurze Übersicht über ähnliche Forschungsarbeiten wie in diesem Projekt gegeben werden. Außerdem wird der generelle Einsatz von CFD in der Betrachtung von frei belüfteten Rinderställen beleuchtet. Schließlich wird darauf eingegangen, mit Hilfe von Windkanalversuchen Simulationen zu validieren.

Bjerg und Andersen (2010) führten, wie im vorliegenden Projekt, für einen frei belüfteten Rinderstall eine Untersuchung zum Einsatz einer partiellen Unterflurabsaugung durch. Die Autoren haben aus der Erfahrung dieser Absaugtechnik aus der Schweinehaltung heraus versucht, dieses System auf einen Rinderstall zu übertragen. Die Berechnungen wurden an einem zweidimensionalen Schnitt durch einen Stall mit der Breite von 72 m durchgeführt. Der Stall hat acht Laufgänge mit Spaltenböden, unter denen sich die Güllekeller befinden, in deren Seitenwänden die Öffnungen für die Absaugung angeordnet sind. Anders als im vorliegenden Projekt wurde in dieser Arbeit die Absaugung derart gestaltet, dass von der einen Seite aktiv Luft über die Gülle geblasen und auf der anderen Seite abgesaugt wird. Beide Ventilatoren sind dabei unabhängig voneinander regelbar. Als Ammoniakquellen wurden in der Simulation die Gülleoberfläche und die Oberfläche der Spaltenböden gewählt. Die Autoren nahmen an, dass sich die Emissionen gleichmäßig auf diese beiden Bereiche aufteilen. Mit dem für Dänemark gültigen Emissionsfaktor von $12 \text{ kg N Kuh}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ ergibt sich umgerechnet auf die jeweilige Fläche eine Anfangskonzentration von $C_{NH_3, \text{Gülle}} = 65 \text{ ppm}$ für die Gülleoberfläche und $C_{NH_3, \text{Boden}} = 8,7 \text{ ppm}$ für die Oberfläche der Spaltenböden. Für die Berechnung mit stark geschlossenen Seitenwänden wurde ein Temperatureinfluss auf die Emissionen von diesen Flächen mitgerechnet. Er betrug $1,068^{T-7}$, wobei T die durchschnittliche berechnete Temperatur auf der emittierenden Oberfläche ist. Die Auswertung der Emissionen erfolgte an den Stallöffnungen und der Absaugung. Die Modellierung der Tiere erfolgte als poröses Volumen mit einer Ausdehnung bis 1,2 m über dem Spaltenboden. Auch die Seitenwandöffnungen wurden für die verschiedenen Klappenstellungen über ein poröses Medium dargestellt. Die variierten Parameter in den Simulationen waren die Strömungsgeschwindigkeit, die Seitenwandöffnung und der Absaugvolumenstrom. Die Luftgeschwindigkeit v_{10} nahm dabei Werte von 1 m/s, 5 m/s und 10 m/s an. Die Seitenwandöffnungen variierten zwischen 100 % (offen), 8 % und 5% in verschiedenen Kombinationen für die windzu- und abgewandten Seiten. Auch der Absaugvolumenstrom wurde für verschiedene Variationen simuliert. Er reichte von $0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ HPU}^{-1}$ (keine Absaugung) bis $160 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ HPU}^{-1}$. Eine HPU (Heat Production Unit) ist dabei eine Umrechnung der Tierzahl in Abhängigkeit der von ihr produzierten Wärme. Zurückgerechnet auf eine Kuh gilt dabei: $1 \text{ HPU} \cong 3/4 \text{ Kuh}$.

Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass unter durchschnittlichen dänischen klimatischen Bedingungen eine Absaugung von $80 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ HPU}^{-1}$ die Ammoniakemissionen dieses Stalls um etwa ein Drittel mit festen und um mehr als die Hälfte mit variablen Seitenwandöffnungen reduzieren kann. Hierbei hat sich außerdem gezeigt, dass die aktive Überblausung im Bereich der Güllekeller zur Unterstützung der Absaugung nur einen minimalen Effekt auf die Reduktion des Ammoniakmassenstroms hat. Bei konstanter Leistung nimmt der Einfluss der Absaugung auf die NH_3 -Konzentration mit zunehmender Windgeschwindigkeit ab. Der Einfluss steigt jedoch wieder bei geschlossenen Seitenwänden, wodurch die Strömungsgeschwindigkeit innerhalb des Stalles sinkt und die Absaugung einen höheren Wirkungsgrad erzielen kann. Eine intelligente Steuerung der Seitenwandöffnungen bietet hier eine gute Möglichkeit, die partielle Unterflurabsaugung zu unterstützen.

Sapounas et al. (2009) haben ebenfalls mittels CFD die Minderungsmöglichkeiten hinsichtlich der Ammoniakemissionen eines frei belüfteten Rinderstalles durch eine partielle Unterflurabsaugung untersucht. Sie verwendeten für ihre Simulationen ein dreidimensionales Stallmodell. Es wurden insgesamt 12 Kombinationen aus variierten Windgeschwindigkeit (1 m/s , 4 m/s und 8 m/s), Sommer- und Wintersituation ($T_{0,Sommer} = 20^\circ\text{C}$, $T_{0,Winter} = 0^\circ\text{C}$) mit angepasster Gülletemperatur und Wärmeabgabe der Kühe und Anströmwinkel ($\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$) betrachtet. Jede dieser Kombinationen wurde mit drei Simulationen untersucht: eine Referenz ohne Absaugung und zwei Simulationen mit Absaugung ($250\text{ m}^3\text{h}^{-1}\text{Kuh}^{-1}$ und $500\text{ m}^3\text{h}^{-1}\text{Kuh}^{-1}$).

Es hat sich gezeigt, dass durch die partielle Unterflurabsaugung die Lüftungsrate im Stall grundsätzlich verbessert wird. Mit steigendem Absaugvolumenstrom steigt diese noch weiter an. Es konnte eine Steigerung von 0,2 % bis 13,2 % gegenüber einem Stall ohne Absaugung beobachtet werden. Der Einfluss der Absaugung auf die Ammoniakemissionen folgt dem gleichen Schema wie bei Bjerg und Andersen (2010). Im Winter lag die Reduktion zwischen 8 % und 35 % und im Sommer zwischen 9 % und 48 % gegenüber einem Stall ohne Absaugung unter gleichen klimatischen Bedingungen. Die höheren Werte gelten dabei für die Situationen bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten. Nichts desto trotz stellten die Autoren fest, dass hier immer noch der Großteil des Ammoniaks vor allem bei hohen Windgeschwindigkeiten aus dem Stall entweicht.

De Paepe (2014) hat im Rahmen seiner Doktorarbeit eine umfassende Untersuchung zum Emissionsverhalten von frei belüfteten Tierhaltungsanlagen durchgeführt. Hierbei hat er sich vor allem auf die Durchströmungscharakteristik eines solchen Stalles und die Ammoniakfreisetzung im Güllekeller konzentriert. Hierfür hat er an einem Stallmodell im Maßstab 1:60 Untersuchungen im Windkanal bei einer Anströmgeschwindigkeit von $\bar{v} = 3,5\text{ m/s}$ durchgeführt. Diese mittlere Anströmgeschwindigkeit auf Höhe des Windkanalmodells bei $z = 0,5\text{ m}$ entspricht im Mittel der Anströmgeschwindigkeit bei einem parabelförmigen Geschwindigkeitsprofil in der Natur und einer Referenzgeschwindigkeit in 10 m Höhe von $v_{10} = 3,8\text{ m/s}$.

Bei der Variation der Seitenwandöffnungen und -konfigurationen konnte festgestellt werden, dass diese einen großen Einfluss auf die Strömung im Stall haben. Hier ist besonders hervorzuheben, dass die Seitenwandöffnung auf der windzugewandten Seite nur einen minimalen Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeit in der Stallmitte hatte, wenn die windabgewandte Seite nur gering geöffnet war.

Ebenfalls wurde in dieser Arbeit der Einfluss einer Schräganströmung untersucht. Eine vollständige Öffnung der Seitenwände bietet hier bei einem Anströmwinkel von $\alpha < 45^\circ$ eine gute Durchströmung des Stalles. Die durchgeführten Windkanaluntersuchungen wurden dann zur Validierung von 2D CFD-Simulationen verwendet. Die numerischen Ergebnisse zeigten dabei gute Übereinstimmungen mit den Windkanalversuchen.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde dann der Fokus auf die Ammoniakemissionen aus dem Güllekeller gelegt. Hierzu wurde ein Windkanalmodell eines Güllekellerabschnittes mit Spaltenboden erstellt, an dem nach der anfänglichen Validierung Untersuchungen bezüglich der Freisetzung von Ammoniak und dem Transfer dessen in den Oberflurbereich gemacht wurden. Der Güllestand, die Luftgeschwindigkeit über dem Spaltenboden und die Einströmung in den Güllekeller (gesteuert über eine Klappe zur Ablenkung der Luft) hatten dabei den größten Effekt auf die Emissionen von Ammoniak aus dem Unterflurbereich. Dabei zeigte sich, dass mit niedrigerem Güllestand die Emissionen abnehmen. Bei einer Erhöhung der Luftgeschwindigkeit über dem Spaltenboden sinken erwartungsgemäß die Ammoniakkonzentrationen. Allerdings steigen die absoluten Emissionen aufgrund des höheren Volumenstroms. Eine Ablenkung der Luft direkt in den Güllekeller durch ein

Hindernis im Stall (Tier, Gegenstand, ...) bewirkt eine Erhöhung der Konzentration über dem Spaltenboden, wodurch die Emissionen ebenfalls steigen. Diese Untersuchungen wurden auch in CFD-Simulationen (diesmal 3D) reproduziert. Es konnten gute Übereinstimmungen zu den erzielten Ergebnissen im Windkanal erreicht werden. Die Emissionen am Windkanalausgang wurden allerdings von den realen Messungen immer unterschätzt, da nur an einer Position die Konzentration ausgewertet worden ist. Die Simulationen haben aber gezeigt, dass sich das Ammoniak vor allem im bodennahen Bereich sammelt.

von Dooren und Sapounas (2013) geben eine kurze Einführung in und einen Überblick über die Verwendung von CFD bei der Untersuchung von frei belüfteten Rinderställen. Hierbei stellen sie unter anderem Forschergruppen vor, die sich besonders mit diesem Thema beschäftigen. Einleitend wird auf Methoden eingegangen, mit denen der Volumenstrom in einem frei belüfteten Rinderstall gemessen werden kann. Anschließend wird erläutert, wie die CFD die Messungen vorbereiten, ergänzen und erweitern kann. Das Problem der Validierung der numerischen Modelle wird dabei ebenfalls thematisiert. Hier hat sich in ihren Recherchen gezeigt, dass hauptsächlich skalierte Modelle aus Windkanalversuchen zur Überprüfung der numerischen Modelle herangezogen werden, bei denen die Übereinstimmung zwischen Numerik und Experiment meist auf einem guten Level liegt. Die Validierung mit Messungen an realen Ställen sei zu kostspielig und aufwendig. Bemängelt wird außerdem, dass es keine Literatur gibt, in der die Empfehlungen aus den Berechnungen in die Praxis des Stallbaus übergegangen sind. Auch sei es für die Vergleichbarkeit von Studien schwierig, dass keine grundsätzlichen Vorgaben zum Aufbau eines numerischen Modells existieren, sodass jede Forschergruppe ihren eigenen Ansatz verfolgt. Die Autoren verdeutlichen am Ende ihres Reports, dass CFD auch eine sehr gute Möglichkeit sei, Experimente und Messungen zu optimieren. Durch ein validiertes Modell könnten beispielsweise Messpositionen in einem Stall bestimmt werden. Außerdem böte sich mit solchen Modellen auch eine Ergänzung von Messungen an. Dadurch würden darüber hinaus gehende Erkenntnisse gewonnen. Insgesamt gebe es aber nur wenige Studien, in denen mit Hilfe von CFD frei belüftete Rinderställe erforscht werden.

Mendes et al. (2014) erweiterten ein CFD-Modell um ein Modell zur Berücksichtigung von metabolischem CO_2 , um so die räumliche und zeitliche Struktur der Luftbewegung im frei belüfteten Rinderstall und die CO_2 -Verteilung vorhersagen zu können. Betrachtet wurde ein Boxenlaufstall mit Spaltenboden für 136 laktierende Kühe, 25 Trockensteher und 33 junge, trächtige Kühe. Im Modell wurden die Tiere durch eine poröse Zone mit unterschiedlichen Porositäten je nach Gruppe dargestellt. Auf diese Zonen wurde dann eine Wärme- und CO_2 -Quelle auf Grundlage von CIGR (2002) gelegt. Die mit dieser Kombination der Modelle erzielten Ergebnisse wurden als realistisch eingestuft. Sie sollen in weiteren Untersuchungen und nach einer stetigen Validierung und Verbesserung als Grundlage für stündliche Vorhersagen in Abhängigkeit von den äußeren klimatischen Bedingungen wie Windgeschwindigkeit oder Lufttemperatur dienen.

Hempel et al. (2015) versuchen ebenfalls über die numerische Strömungsmechanik die Durchströmungscharakteristik eines frei belüfteten Rinderstalles zu bestimmen, um daraus Rückschlüsse auf das Stallklima und die Emissionen eines solchen Stallsystems ziehen zu können. Einfluss auf die Durchströmung haben dabei neben den äußeren klimatischen Bedingungen auch die Tiere selbst, beispielsweise durch deren abgegebene Wärme. Die Validierung der Simulationsergebnisse beruhe im Idealfall auf einem 3-Säulen-Prinzip: numerische Simulationen, Messungen im Grenzschichtwindkanal und Messungen an realen Ställen. Auf alle drei Methoden wird in diesem paper eingegangen. Gerade bei den Messungen im Stall habe sich gezeigt, dass selbst in besonders symmetrischen Gebäuden die räumliche Verteilung der Durchströmung sehr unsymmetrisch sein kann. Dies konnte

sowohl bei den numerischen Simulationen als auch bei den Windkanalmessungen bestätigt werden. Ferner zeigen die Ergebnisse, dass der windzugewandte Teil des Stalles eine bessere Durchlüftung erfährt, als die abgewandte Stallhälfte. Dies sei besonders vor dem Hintergrund der Steigerung der Extremwetterlagen im Sommer (mehr sehr heiße Tage) wichtig. Großen Einfluss auf die Durchströmungscharakteristik haben unter anderem die Turbulenz der Zuströmung und die Öffnung der Seitenwände.

Qianying et al. (2018) haben in einem Windkanal den Einfluss der Seitenwandöffnungen auf die Durchströmung eines frei belüfteten Rinderstalles untersucht. Die Versuche fanden an einem skalierten Stallmodell ohne Tiere in einem Grenzschichtwindkanal statt. Das Geschwindigkeitsprofil innerhalb des Stalles wurde bei verschiedenen Seitenwandöffnungen und -positionen bei einer Anströmgeschwindigkeit von 8 m/s senkrecht zum First mit einem Laser-Doppler-Anemometer (LDA) an diskreten Punkten ermittelt. Es zeigte sich, dass die Position und Fläche der Öffnungen einen großen Einfluss auf die Durchströmung des Stalles haben. Beispielsweise wird davon abgeraten, an kalten und windigen Tagen den unteren Bereich der Seitenwände offen zu halten, da dadurch die Gefahr von Zugluft deutlich steigt. Gleichzeitig sei dies aber eine gute Konfiguration für heiße Sommertage, da so eine große Menge an Wärme abtransportiert werden kann. Darüber hinaus wurde deutlich, dass die Öffnungen der Seitenwände auch die Strömung hinter dem Stall auf der windabgewandten Seite beeinflussen. Hier sind allerdings weitere Untersuchungen und Detailbetrachtungen nötig. Generell profitieren Tiere, die in der Nähe der Seitenwandöffnungen stehen mehr von der Durchlüftung als Tiere in der Mitte des Stalles, da hier die Luftgeschwindigkeiten kleiner sind. Die Autoren betonen, dass solche Arbeiten als Validierung von numerischen Modellen herangezogen werden können.

5. Arbeitspakete

In den folgenden Abschnitten werden die im Antrag ausgearbeiteten Arbeitspakete beschrieben. Es wird dabei unterschieden, ob die Durchführung vom Institut für Agrartechnologie (AT), der Norddeutschen Bauernsiedlung GmbH (NBS) oder beiden erfolgt ist.

5.1. AP 1 (AT und NBS): Detaillierung des Lüftungskonzepts und Auswahl der Stallbasis

Am 11.04.2018 trafen sich die Projektbeteiligten Herr Julian Hartje und Herr Stefan Linke (AT) sowie Herr Hans-Jürgen Ahrens (NBS) am Thünen Institut für Agrartechnologie in Braunschweig, um das im Antrag beschriebene Konzept in eine Planungszeichnung zu integrieren. In diesem Gespräch wurde festgelegt, dass im Stall der Spaltenboden Fläbo55 der Firma Suding (Suding (2018)) verwendet werden soll. Des Weiteren konnte der konstruktive Aufbau der Segmente und der Absaugvorrichtung im Unterflurbereich besprochen werden. Herr Ahrens machte deutlich, dass das vorliegende Konzept großes Potential in der Rinderhaltung hat, da es bis zu diesem Zeitpunkt kein System zur Ammoniakemissionsminderung für frei belüftete Rinderställe gab. Aus diesem Grund wollte er die partielle Unterflurabsaugung in das modernste Stallkonzept einbauen, das zurzeit von der NBS geplant und umgesetzt wird. Ein Abluftreinigungssystem sollte zu einem späteren Zeitpunkt ausgewählt werden. Ein Problem dabei könnte die noch nicht vorhandene Zertifizierung der DLG sein.

5.2. AP 2 (NBS): Erstellung einer Bauzeichnung

Aufgrund der in AP 1 besprochenen Ausführungen wurde durch die NBS eine erste Entwurfszeichnung (s. Abbildungen 53 und 54 im Anhang) erstellt und am 11.06.2018 an die Projektbearbeiter als pdf-Datei übermittelt. Eine elektronische Übermittlung als CAD-Daten war aufgrund der fehlenden Möglichkeiten im verwendeten Tool der NBS nicht möglich. Während der Implementierung des Modells in das Simulationsprogramm (vgl. Abschnitt 5.4) ergaben sich immer wieder Zwischenfragen, die zu einer ständigen Aktualisierung der Entwurfszeichnung in mehreren Schritten führten. Die letzte Aktualisierungs-version 08 wurde am 20.03.2019 übermittelt. Hier ist bereits eine mögliche Konfiguration zur Integration einer Abluftreinigungsanlage in das System dargestellt. Die Zeichnungen befinden sich im Anhang in den Abbildungen 55 bis 59.

5.3. AP 3 (AT): Simulationsprogramm beschaffen und einrichten

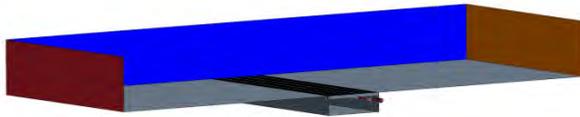
Das Strömungssimulationsprogramm STAR-CCM+ von der Firma Siemens PLM wurde zu Beginn des Projektes in der zu diesem Zeitpunkt aktuellsten Version 12.06.011 auf zwei Arbeitsplatzrechnern installiert. Ein Rechner (Betriebssystem Windows 10 64-bit) dient dabei zur Auswertung (Postprocessing) der Simulationen, der andere (Windows 7 64-bit) zum Preprocessing (Modellaufbau, Vernetzung, Solvareinstellungen) und zum eigentlichen Berechnen. Letzterer ist mit acht CPUs und einem Arbeitsspeicher von 64 GB ausgestattet, um die Größe der Rechenmodelle bewältigen zu können. Im Laufe des Projektes konnte zum Rechnen zunächst auf einen externen Großrechner in Berlin und später auf den neuen Cluster am Thünen-Institut ausgewichen werden (siehe dazu Abschnitt 5.4.2). Der Computer zum Postprocessing ist ein normaler Arbeitsplatzrechner mit einer CPU und einem Arbeitsspeicher von acht GB. Nach dem Ausweichen auf die Cluster wurde zunehmend der zweite Rechner aufgrund der besseren Performance ebenfalls zum Postprocessing verwendet. Die Version von STAR-CCM+ wurde während des Projektes nicht aktualisiert, damit mögliche Änderungen in der Software nicht zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen, sodass alle durchgeführten Simulationen miteinander verglichen werden können.

Im Bearbeitungszeitraum von AP 3 wurden verschiedene Testsimulationen durchgeführt, um sich in die Fragestellung einzuarbeiten und eine Auswahl für die in diesem Projekt zu verwendenden Modelle zu treffen. Des Weiteren dienten die Testsimulationen zur Erarbeitung von Vernetzungsrichtlinien für das spätere Modell des Gesamtstalls. In den folgenden Abschnitten wird auf diese zwei Punkte näher eingegangen.

5.3.1. Testsimulationen

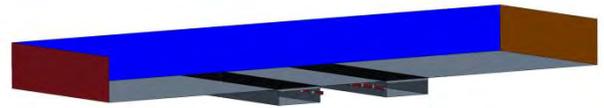
Zur Einarbeitung in die Fragestellung der freien Lüftung im Zusammenspiel mit einer mechanischen Lüftung wurden verschiedene Testgeometrien erstellt und an diesen verschiedene dreidimensionale numerische Modelle und Solvareinstellungen erprobt.

Zunächst erfolgte der Aufbau einer Geometrie, die nur aus einem überströmten Spaltenboden mit einem darunter liegenden Güllekeller besteht (vgl. Abb. 1a). Diese Geometrie wurde dann nach und nach erweitert, sodass im nächsten Schritt die Implementierung eines zweiten Güllekanals folgte, analog zum späteren Entwurfsstall. Darauf aufbauend wurde, um die Stallstruktur zu repräsentieren, ein Dach über die beiden Güllekanäle modelliert. Anschließend kamen die Kühe dazu (vgl. Abbn. 1a - 2b). In allen diesen Testsimulationen wurde die Absaugung nicht über Ventilatoren, sondern über eine Randbedingung dargestellt. Hierbei herrschte an den Absaugschlitzen eine Auslassgeschwindigkeit von $0,8 \text{ m/s}$ in x-Richtung. Die Testmodellierung der Ventilatoren erfolgte in einer separaten, kleinen Geometrie, die aus einer Einströmfläche und der späteren Segmentstruktur mit einem Ventilator bestand (vgl. Abb. 60 im Anhang). In den Evolutionsschritten 1 - 4 (vgl. Abbn. 1a - 2b) wurde für die Einströmung am linken Rand ein parabelförmiges Geschwindigkeitsprofil aufgeprägt (vgl. Linke (1999)), das in Höhe von 10 m eine Geschwindigkeit von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ aufweist (vgl. Gl. 5.2). Dies erfolgte für die insgesamt 27 Testrechnungen. Die Modellierung der Ventilatoren wurde in zwei Rechnungen erprobt. Folgende Erkenntnisse ergaben sich aus den Testrechnungen:



↳

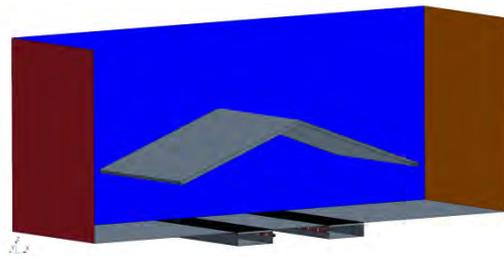
(a) Evolutionsschritt 1, ein Gang mit Spaltenboden



↳

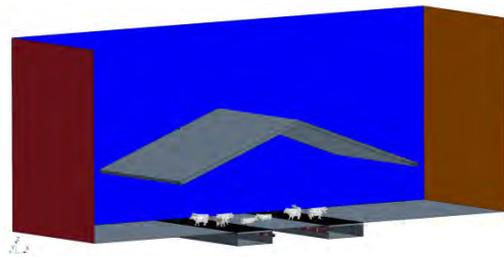
(b) Evolutionsschritt 2, zweiter Gang mit Spaltenboden

Abb. 1.: Evolutionsschritte 1 & 2 der Testsimulationen



↳

(a) Evolutionsschritt 3, zwei Gänge mit Spaltenboden + Dach



↳

(b) Evolutionsschritt 4, zwei Gänge mit Spaltenboden + Dach + Kühe

Abb. 2.: Evolutionsschritte 3 & 4 der Testsimulationen

- Da für die zu berechnenden Geometrien eine große Elementanzahl erwartet wird, wird die Strömung über den Coupled Flow-Solver modelliert. Die Anzahl der benötigten Iterationsschritte bis zur Konvergenz ist aufgrund der Kopplung der Erhaltungsgleichungen unabhängig von der Elementanzahl des Modells (Adrion (2012)). Automatisch aktiviert wird beim Coupled-Flow-Solver das Modell Gradients zur Berechnung der Gradienten. Hierdurch werden auch automatisch Korrekturen in Zellen mit schlechter Qualität durchgeführt, um die Konvergenz der Rechnung zu gewährleisten (STAR-CCM+ (2018a)).
- Um Temperaturunterschiede und deren Einfluss auf die Strömung abbilden zu können, wird als Zustandsgleichung das Modell des idealen Gases verwendet. Hierzu ist zusätzlich der Coupled-Energy-Solver erforderlich und wird daher automatisch ausgewählt. Die Testrechnungen der Evolutionsstufen 1 - 4 haben gezeigt, dass es bei Verwendung des idealen Gases für die Konvergenz und das physikalische Strömungsverhalten entscheidend ist, dass die Referenzdichte und -temperatur an den Ein- und Auslässen exakt zusammenpassen. Das heißt, dass die eingestellte Referenzdichte diejenige sein muss, die die Luft bei der eingestellten Referenztemperatur und dem Referenzdruck hat.
- Aufgrund der Größe der Geometrien und der sehr geringen Viskosität von Luft ist die Strömung im Berechnungsgebiet turbulent. Daher werden für das Viskositätsverhalten die entsprechenden Modelle angewählt. Das Reynolds-Averaged Navier-Stokes-Verfahren (kurz: RANS) stellt dabei den gängigen Kompromiss zwischen Vereinfachung und zur Verfügung stehender Rechnerkapazität dar.

- Die Turbulenzmodellierung erfolgt über das K-Epsilon Realizable Turbulenzmodell. Es hat seine Vorteile in der Berechnung von freien Strömungen (STAR-CCM+ (2018a)). Da in diesem Projekt das exakte Grenzschichtverhalten der Strömung nicht von Interesse ist, wird dieses Modell verwendet. Aufgrund der starken Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit innerhalb des Modells ist es sehr aufwendig, den dimensionslosen Wandabstand y^+ an allen Wänden auf einen gemeinsamen Wertebereich einzustellen. Daher wird über das All y^+ Wall Treatment die Stabilität und physikalisch korrekte Berechnung über das gesamte Rechengebiet gewährleistet. Dennoch haben die Testrechnungen gezeigt, dass zu große y^+ -Werte einen negativen Effekt auf die Konvergenz der Rechnung haben. An diesen Stellen wird dann über die strukturierten Prismenschichten auf der Wand das entsprechende y^+ eingestellt.
- Da die Geometrie eine große Ausdehnung in z hat, ist es erforderlich den Einfluss auf die vertikale Druckverteilung zu berücksichtigen. Daher wird zusätzlich das Gravity-Modell ausgewählt.
- Die Testrechnungen der Evolutionsstufen 1 - 4 haben gezeigt, dass eine bessere Konvergenz und eine physikalischere Darstellung der NH_3 -Verteilung im Unterflurbereich durch die Modellierung des Ammoniakanteils über einen passiven Skalar und nicht über das numerisch aufwendigere Multi-Component-Gas-Modell erreicht werden kann. Dies entspricht auch der gängigen Praxis in bereits vergangenen Projekten am Institut (vgl. Stolz et al. (2014) und Linke et al. (2012)).
- Die Modellierung der Ventilatoren erfolgt über ein Fan-Interface, das den Ventilator über einen Drucksprung zwischen den beiden Seiten des Interfaces simuliert. Diese Form der Modellierung eignet sich für Strömungen mit geringen Machzahlen (STAR-CCM+ (2018a)), sodass das Modell für dieses Projekt geeignet ist. Dabei muss der Ventilator nicht als gesonderte Geometrie dargestellt werden. Allerdings wird eine Fankurve bei einer speziellen Drehzahl benötigt, die als Tabelle in das Programm eingelesen wird. Hier ist der Druckaufbau in Pa über dem Volumenstrom in m^3/s aufgetragen. Aufgrund der Nenndrehzahl und der vom Benutzer eingestellten Betriebsdrehzahl wird über die Fangesetze die entsprechende Performance des Ventilators berechnet (STAR-CCM+ (2018a)). Auf die Auswahl eines geeigneten Ventilators wird in Abschnitt 5.4.3 näher eingegangen.
- Die Modellierung der Umlenkbleche stromab der Ventilatoren im Unterflurbereich wird über ein Baffle-Interface realisiert. Dies modelliert die Umlenkbleche als Strömungshindernisse ohne physikalische Dicke. Eine Ausmodellierung dieser sehr dünnen Bleche würde die erforderlichen Elemente drastisch erhöhen. Außerdem können hierdurch sehr leicht Elemente mit einer schlechten Elementqualität entstehen, wodurch die numerische Stabilität der Berechnung beeinträchtigt werden kann.

In Tabelle 1 findet sich eine Übersicht zu den ausgewählten Modellen für die Berechnung des Stalls nach der Zeichnung der NBS.

Gruppe	Modell
Raum	Dreidimensional
Zeit	Stationär
Material	Gas
Strömung	Coupled Flow Gradient
Zustandsgleichung	Ideales Gas Coupled Energy
Viskositätsverhalten	Turbulent Reynolds-Averaged Navier-Stokes
Turbulenzmodellierung	K-Epsilon Turbulence Realizable K-Epsilon Turbulence Two-Layer Exact Wall Distance Two-Layer All y+ Wall Treatment
Zusätzlich	Gravity Passive Scalar
Modellierung der Ventilatoren	Fan-Interface
Modellierung der Umlenkbleche	Baffle-Interface

Tab. 1.: Übersicht der ausgewählten numerischen Modelle zur weiteren Berechnung im Projekt

5.3.2. Vernetzungsrichtlinien

Aus den Testrechnungen konnten verschiedene Empfehlungen für die Vernetzung des geometrischen Modells in der projektspezifischen Fragestellung hergeleitet werden. Hierbei geht es vor allem um die Feinheit der Vernetzung der einzelnen Oberflächen. Es müssen alle relevanten Kanten und Radien adäquat abgebildet werden, um die Realität in das Modell übertragen zu können. Allerdings darf nicht zu detailliert vernetzt werden, da sonst die Elementanzahl im geometrischen Modell zu groß wird, sodass die Bearbeitungs- und Rechenzeit zu hoch werden. Es gilt daher bei der Vernetzung immer einen Kompromiss zwischen Detailgenauigkeit und -notwendigkeit zu finden. Dies wird besonders bei den verwendeten Kuhgeometrien deutlich. Eine sehr feine Vernetzung bildet die Kuh detailgetreu ab, führt aber zu sehr vielen Elementen. Vergrößert man das Netz, sinkt zwar die Elementzahl, aber die Oberfläche der Kuh wird zunehmend verfremdet, sodass die Kuh nicht mehr erkennbar ist. Dies ist für drei verschiedene Feinheiten des Netzes in den Abbildungen 3a bis 3c dargestellt.



Abb. 3.: Detailgenauigkeit am Beispiel der Kuh in Abhängigkeit verschiedener Netzfeinheiten

Zu erkennen ist, dass es zwischen den beiden feinen Stufen kaum noch eine Verbesserung der Darstellung gibt. Aus diesem Grund wurde in der Simulation das mittlere Netz aus Abbildung 3b verwendet, da hier die Kuh als solche erkennbar, gleichzeitig aber die Elementanzahl deutlich kleiner als bei der sehr feinen Variante ist.

Des Weiteren musste darauf geachtet werden, die Qualität der erzeugten Elemente unter einem bestimmten Grenzwert zu halten, da sich sonst numerische Instabilitäten und Konvergenzprobleme einstellen können (Adrion (2012)). Größtes Problem stellte hierbei der Skewness-Angle dar, der vor allem in den Übergängen vom Spaltenboden zu den Hufen der Kühe immer wieder Werte außerhalb des geforderten Bereiches einnahm. Der Skewness-Angle ist der Winkel, der sich zwischen der Verbindung der Mittelpunkte zweier benachbarter Zellen und der Flächennormalen der Fläche, die sich die beiden Zellen teilen, bildet (vgl. Abbildung 4).

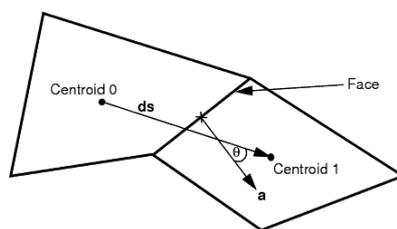


Abb. 4.: Darstellung des Skewness-Angles Θ , STAR-CCM+ (2018a)

Dieser Winkel sollte kleiner als 85° sein, da es sonst zu Problemen in der Flussberechnung zwischen den beiden Zellen kommen kann (STAR-CCM+ (2018a)). Hier mussten immer wieder neue Volumenkörper mit einer lokalen Netzanpassung erstellt werden, um den Winkel im Hufbereich der Kühe in den Griff zu bekommen. Eine Anfrage beim Support der Firma Siemens PLM führte leider nicht zu einer Verbesserung des Workflows, da es das gewünschte Feature (lokale Netzanpassung ohne eine komplette Neuvernetzung) in STAR-CCM+ zurzeit nicht gibt (STAR-CCM+ (2018b)). Waren zu einem Zeitpunkt nur noch wenige Elemente mit einem Skewness-Angle größer als 85° vorhanden, so konnten diese durch eine programminterne Routine aus der Berechnung entfernt werden, um so die Stabilität der Rechnung zu erhöhen.

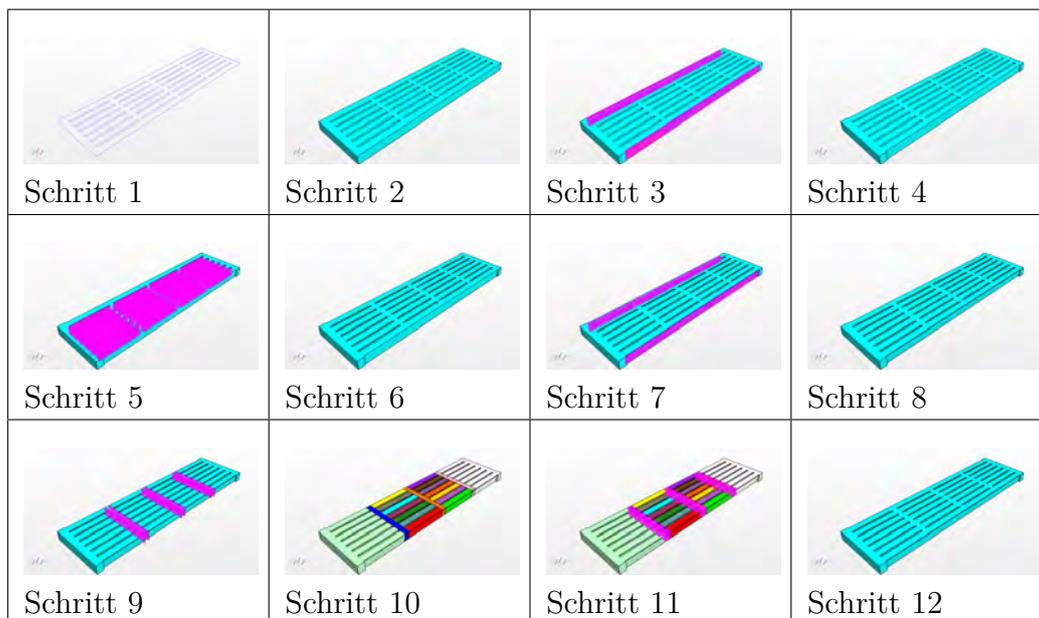
5.4. AP 4 (AT): Übertragung der Geometrie aus der Bauzeichnung in das Simulationsprogramm

In diesem Arbeitspaket wurde das Geometriemodell des Stalls erzeugt. Ferner beinhaltet es die Erstellung des Luftraumes um den Stall herum sowie die Vernetzung. In diesem Zusammenhang kam in der Arbeitsgruppe das Thema High-Performance-Computing (HPC) auf und wurde diskutiert. Diesem ist daher ein zusätzlicher Abschnitt gewidmet.

5.4.1. Geometrieerstellung

Nachdem die NBS in AP 2 (vgl. 5.2) die Zeichnung erstellt hatte, konnte nach dessen Übermittlung mit der Erstellung der Geometrie in der Software STAR-CCM+ begonnen

werden. Aufgrund der Größe und Komplexität des Stalls ist dieses mit einigem Aufwand verbunden. Der Geometrieaufbau erfolgte dabei im internen 3D-CAD-tool von STAR-CCM+. Hier werden zunächst zweidimensionale Flächen erstellt, die anschließend zu dreidimensionalen Körpern extrudiert werden. Diese können dann durch boolesche Operationen miteinander verbunden oder voneinander abgezogen werden. So wird nach und nach die Geometrie aufgebaut. Durch die Verwendung geeigneter Operationen ist es außerdem möglich, einmal erstellte Körper, beispielsweise ein Spaltenbodenelement, zu vervielfachen oder in die andere Gebäudehälfte zu spiegeln.



Tab. 2.: Übersicht über die Schritte zur Geometrieerstellung eines Spaltenbodenelementes

In Tabelle 2 sind die Schritte zur Erstellung eines Spaltenbodenelementes dargestellt. Zunächst wird die Oberfläche als ein Rechteck („sketch“) erstellt, in dem bereits die Spalte abgebildet sind (Schritt 1). Dieses wird anschließend zu einem Quader, der die Größe des Spaltenbodens hat, extrudiert (Schritt 2). Anschließend müssen die Negative der seitlichen Ausschnitte erstellt und von diesem Quader abgezogen werden (Schritt 3 und 4). Ein analoges Vorgehen in den Schritten 5 - 8 erfolgt für die Schrägen an den innen und außen liegenden Spalten. Anschließend müssen die Schrägen für die stirnseitigen Spalte erstellt und abgezogen werden (Schritte 9 und 10). Bei diesem Schritt passiert eine Aufteilung des Körpers in mehrere Teilkörper. In den verbleibenden Schritten 11 und 12 werden die Lücken wieder geschlossen und der Spaltenboden zu einem Volumenkörper vereint.

Nach diesem prinzipiellen Vorgehen erfolgte der gesamte Aufbau des Stalls. Eine Darstellung der fertigen Stallgeometrie ohne Nebengebäude und Silos findet sich in Abbildung 5. In einem nächsten Schritt muss der Luftraum als diskreter Raum aufgebaut werden. Im einfachsten Fall ist das ein Quader. Von diesem wird dann die Stallgeometrie subtrahiert, sodass sie als Hindernis im Luftraum entsteht. Verdeutlicht wird dies in den Abbildungen 7 und 8. Abbildung 7 zeigt die Geometrie des Luftraumes und in Abbildung 8 ist der Luftraum durch das Netz als rosa Polyeder dargestellt.

Die in den Rechnungen mit dem Segment verwendeten Kuhgeometrien wurden durch einen 3D-Scan eines Kuhmodells erzeugt. Die dabei entstandene CAD-Datei kann von STAR-CCM+ eingelesen werden. Die Kuh ist ein eigener Geometriepart, der manipuliert werden kann (skalieren, rotieren, verschieben, duplizieren, u. v. m.).

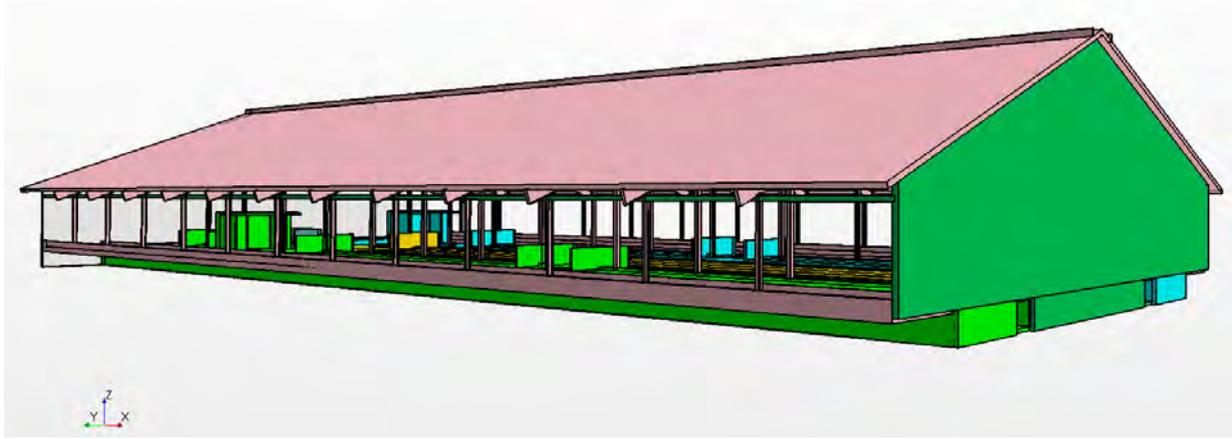


Abb. 5.: Stallgeometrie ohne Nebengebäude und Silos in STAR-CCM+

5.4.2. High-Performance Computing (HPC)

Bereits während des Geometrieaufbaus wurde deutlich, dass der Stall aus vielen Bereichen besteht, die unterschiedliche Anforderungen in Bezug auf ihre spätere Vernetzung haben. Da sind auf der einen Seite die Spaltenböden, die mit ihrer Spaltenbreite von 35 mm eine sehr feine Vernetzung erfordern, damit die Strömung hier gut aufgelöst werden kann. Auf der anderen Seite stehen die großen Dimensionen des Stallgebäudes selbst und der sich darum ergebende Luftraum, der um ein Vielfaches größer gestaltet werden muss (vgl. 5.4.4). Es wurde erwartet, dass bei einer Simulation des gesamten Stallgebäudes, inklusive Kühen, Absaugung und Umgebung, ein geometrisches Modell entsteht, das eine Elementanzahl von deutlich mehr als 20.000.000 Elementen aufweist. Solch große Geometrien waren mit der zu dem Zeitpunkt am Institut zur Verfügung stehenden Technik (vgl. 5.3) nicht in einer vernünftigen Art und Weise zu bearbeiten. Eine Berechnung von circa 1.000 Iterationen hätte wahrscheinlich mehr als 48 Stunden gedauert, sodass hier Antwortzeiten entstanden wären, die ein flüssiges Arbeiten und Berechnen von verschiedenen Varianten und deren Vergleich nicht zugelassen hätten. Aus diesem Grund wurden Bemühungen gestartet, einen Cluster aufzubauen, der es erlaubt, solche Simulationen mit sinnvollen Antwortzeiten berechnen und bearbeiten zu können. Durch Absprachen mit der IT-Abteilung am Standort Braunschweig ist deutlich geworden, dass auch andere Institute Interesse an einem solchen Cluster oder anderen High-Performance Systemen haben. Daher wurden mit einem externen Hardware-Lieferanten Gespräche begonnen, um ein System, das den Anforderungen aller Institute gerecht wird, am Standort aufzubauen. Da so etwas nicht in kurzer Zeit vollzogen werden konnte, wurde sich projektintern darauf geeinigt, zunächst nur einen Ausschnitt des Stalls in der Simulation zu bewerten, damit die Elementzahlen nicht zu groß werden. Die Vernetzung und Berechnung des gesamten Stallgebäudes in einer Simulation würde dann erfolgen, wenn der Cluster aufgebaut ist und genutzt werden kann.

Parallel wurden Bemühungen gestartet, an anderen Stellen Rechenkapazitäten zu bekommen. Eine Möglichkeit bot der Norddeutsche Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen (HLRN), der für Wissenschaft und Forschung Supercomputer zur Verfügung stellt (Norddeutscher Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen (HLRN) (2018)). Nach Recherchen und Kontaktanfragen hat sich herausgestellt, dass Mitarbeiter eines Bundesforschungsinstitutes kostenfreien Zugang über eine Benutzerkennung zu den Ressourcen des HLRN beantragen können. Über ein Antragsformular und eine Identitätsprüfung wur-

de eine solche Kennung beantragt und eingerichtet. Für die Kommunikation mit dem externen Server war es erforderlich, von der standortinternen IT eine Portfreigabe für die Firewall zu erhalten. Nach Beseitigung weiterer kleinerer Startprobleme konnte ab Anfang März 2019 auf dem Server des HLRN in Berlin gerechnet werden. Dies ermöglichte sowohl eine Beschleunigung der Simulationen selbst als auch eine Erhöhung der Quantität, da nun mehrere Rechnungen aufgrund der höheren Rechenkapazität gleichzeitig durchgeführt werden konnten.

Bei der beantragten Benutzerkennung handelte es sich um ein Benutzerkonto, das zeitlich begrenzt die Verwendung von einem bestimmten Kontingent an NPL (Norddeutsche Parallelrechner-Leistungseinheit) erlaubt. Pro Quartal standen 2.500 NPL für die Laufzeit des Kontos zur Verfügung. Die NPL wurden in Abhängigkeit der Nutzungszeit (Dauer der Rechnung auf dem Cluster) und der verwendeten Ressourcen (Anzahl CPUs) vom Nutzerkonto abgebucht (Norddeutscher Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen (HLRN) (2019)). Zur Übermittlung der Dateien wurde eine ssh-Verbindung über die Windowsassistenten PuTTY oder WinSCP hergestellt. Das Starten der Simulation in der clusterseitigen Linuxumgebung erfolgte über ein shell-Skript. Darin wurden sowohl die Laufzeit der Simulation (maximal 12 h) als auch die gewünschten Ressourcen bestimmt. Außerdem erfolgten der Programmaufruf sowie das Anziehen der entsprechenden Simulationsdatei über das Skript. Nach Fertigstellung der Simulation konnte die Datei für das Postprocessing auf den lokalen Rechner zurückkopiert werden.

Die bereits gestarteten Bemühungen für einen Cluster am Standort in Braunschweig wurden währenddessen weiter intensiviert. In mehreren Gesprächsrunden mit allen interessierten Thünen-Instituten konnte sich auf ein System geeinigt werden, das anschließend beschafft und eingerichtet wurde. Bei der Inbetriebnahme für das vorliegende Projekt konnte auf die Erfahrungen, die bereits mit dem externen Clustersystem des HLRN gesammelt worden waren, zurückgegriffen werden. Der Start des Thünen-Clusters fiel dabei in das Ende der Laufzeit der Benutzerkennung auf dem HLRN, sodass ein lückenloser Übergang gewährleistet werden konnte. Die Handhabung der Simulationen auf dem Thünen-Cluster erfolgt prinzipiell auf die gleiche Art und Weise wie auf dem vorherigen System. Die Architektur der beiden Clustersysteme unterscheidet sich allerdings. Hierauf wird an dieser Stelle aber nicht eingegangen, da dies nicht Gegenstand des Projektes ist.

Auf dem aktuellen System können zwei Simulationen gleichzeitig laufen. Eine Staffe- lung über ein java-Skript ermöglicht aber das automatische Starten und Speichern von mehreren Simulationen hintereinander, sodass beispielsweise über das Wochenende oder während der Urlaubszeit mehr als zwei Simulationen durchgeführt werden können. Die Nutzung des lokalen Thünen-Clusters bot eine ausreichende Menge an Ressourcen zur Bewältigung der Simulationen. Außerdem war es jederzeit nach Absprache mit den anderen Instituten möglich, die für das eigene Institut vorgesehenen Kapazitäten dauerhaft oder wenigstens zur Abfederung einer Spitze zu erhöhen. Darüber hinaus war der vor Ort ansässige Support ein starker Vorteil, sodass bei kleinen Problemen oder Fragen sofort gehandelt werden konnte.

5.4.3. Auswahl eines Ventilators

Aufgrund der langjährigen Erfahrung im Bereich der Lüftung von Tierställen am Institut wurde sich zunächst auf ein Ventilator-Modell der Firma Ziehl-Abegg geeinigt, die ihrerseits im Bereich der Lufttechnik für den Einsatz in der Landwirtschaft spezialisiert ist

(Ziehl-Abegg SE (2016a)). Die Wahl fiel hierbei auf das Modell FN063-Zl_.GL._7P3. Ein Datenblatt findet sich in Ziehl-Abegg SE (2016b). Dieser kann die zunächst angenommene erforderliche Druckerhöhung von 320 Pa liefern. Diese setzt sich aus 4 x 30 Pa für die Umlenkungen bis zum Wäscher und die maximal 230 Pa von zwei Wäschern (eine Bio-Stufe, eine Chemo-Stufe) zusammen, die der Luftstrom überwinden muss (Hahne (2018)). Dies waren zunächst Annahmen, um einen Ventilator auswählen zu können. Im weiteren Projektverlauf ergaben sich hierbei aber keine Änderungen, sodass er in allen Simulationen verwendet worden ist. Die Kennlinie für die numerische Modellierung wird für diskrete Punkte einer Drehzahl (im Projekt war dies die Maximaldrehzahl von 1.600 rpm) aus dem Kennfeld abgelesen und als Tabelle in das Programm STAR-CCM+ eingelesen.

5.4.4. Erstellung des Luftraumes und Vernetzung

In diesem Abschnitt wird auf die räumliche Diskretisierung des erstellten geometrischen Modells eingegangen. Im Laufe des Projektes wurden drei Modelle erzeugt, auf deren Grundlage verschiedene Simulationen durchgeführt wurden. Dies ist das in Abschnitt 5.4.2 erwähnte Segment, das nur einen Ausschnitt aus dem Gesamtstall betrachtet. Außerdem wurde in der zweiten Projekthälfte der Gesamtstall als Modell aufgebaut. Für die Betrachtung der natürlichen Konvektion, einer Strömung, die nur durch Gravitation und Dichteunterschiede im Fluid aufgrund von Temperaturunterschieden entsteht, wurde das Modell des Segmentes angepasst. Im Gegensatz zur natürlichen Konvektion wird die Strömungssituation mit aufgeprägter Strömungsgeschwindigkeit am Einlass als erzwungene Konvektion bezeichnet. Zusammenfassend sind diese drei Modelle folglich:

- Segment - erzwungene Konvektion
- Gesamtstall
- Segment - natürliche Konvektion

Auf jedes dieser drei Modelle wird in den entsprechenden folgenden Abschnitten näher eingegangen. Die Grundlagen werden am Segmentmodell für die erzwungene Konvektion erläutert. Für die beiden anderen Modelle wird lediglich auf die Unterschiede beziehungsweise die spezifischen Anpassungen eingegangen. Dies gilt auch für die Ausführungen zu den Randbedingungen in Abschnitt 5.4.5.

Segment - erzwungene Konvektion

Der in den Simulationen zu betrachtende Ausschnitt des Gesamtstalls (vgl. Abschnitt 5.4.2) sollte folgende Kriterien erfüllen:

- Simulation von einem Stallbereich, der frei von baulichen Strömungshindernissen ist, da
 - der Einfluss von Melkrobotern, Buchtenwänden, Krankenstall und anderen Aufbauten zunächst sekundär ist.

- auf diese Weise erst einmal eine grundsätzliche Betrachtung der Absaugung und dessen Performance gemacht werden kann.
- Darstellung von mindestens zwei Ventilatoren pro Absaugseite, damit deren Zusammenspiel beobachtet werden kann

Aus diesen Gründen wurde der in Abbildung 6 eingezeichnete Stallbereich mit einer Breite von 19 m gewählt.

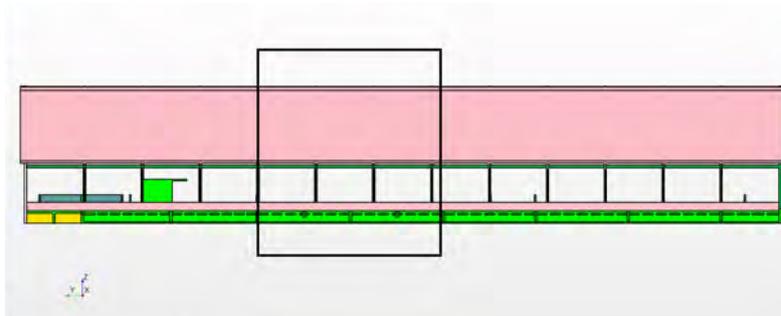


Abb. 6.: Ausgewählter Teilbereich aus Gesamtstall für Berechnung

Der Luftraum wurde daraufhin zunächst analog zu den in Abschnitt 5.3 durchgeführten Testrechnungen ausgeführt. Eine Darstellung mit dessen Außenmaßen findet sich in Abbildung 7.

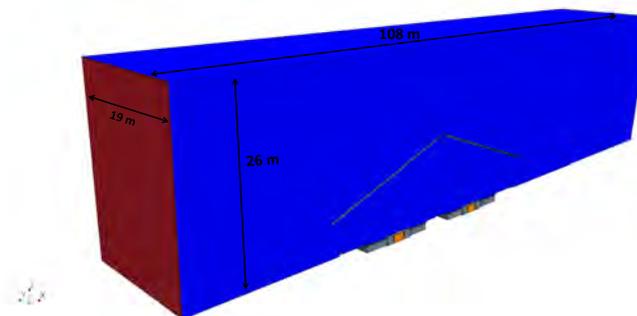


Abb. 7.: Größe des Luftraumes um Stallausschnitt

Der Luftraum hat eine Breite von 19 m, entsprechend dem gewählten Ausschnitt aus dem Realstall. Die Länge beträgt insgesamt 108 m, wobei vor dem Stall etwa 22 m und hinter dem Stall etwa 48 m liegen. So soll eine freie An- und Abströmung des Stalls gewährleistet werden, ohne dass die Grenzen diese beeinflussen. Die Höhe des Luftraumes beträgt 26 m, also in etwa das doppelte der Firsthöhe des Stalls. Insgesamt wurden 13 Kühe im Stall positioniert, um als natürliches Strömungshindernis zu dienen. Für die Vernetzung wurden die in Abschnitt 5.3 erarbeiteten Vernetzungsrichtlinien übernommen. Darüber hinaus mussten lokale Verfeinerungen zur Erfüllung der Qualitätskriterien durchgeführt werden. Dies geschah durch eingefügte Blöcke (Volumetric Control), für die die Elementkantenlänge definiert werden kann. Die lokalen Verfeinerungen wurden dabei in zwei Bereichen durchgeführt. Eine Verfeinerung fand an drei Übergängen der I-Träger zu den Dachbalken statt (Elementkantenlänge = 0,050 m) und die andere an den Hufen der Kühe. Hier wurde nochmals in einen gröbereren (Elementkantenlänge = 0,015 m) und einen feineren (Elementkantenlänge = 0,0075 m) Teilbereich unterschieden, je nach Hufe und je nach

Stärke der Verfehlung der Elementkriterien. Alle eingefügten Blöcke sind im Anhang in Abbildung 61 zu erkennen. Dies führte dazu, dass das Modell schließlich eine Elementanzahl von 10.924.083 aufwies. Eine Visualisierung der vernetzten Geometrie findet sich in den Abbildungen 8a und 8b.

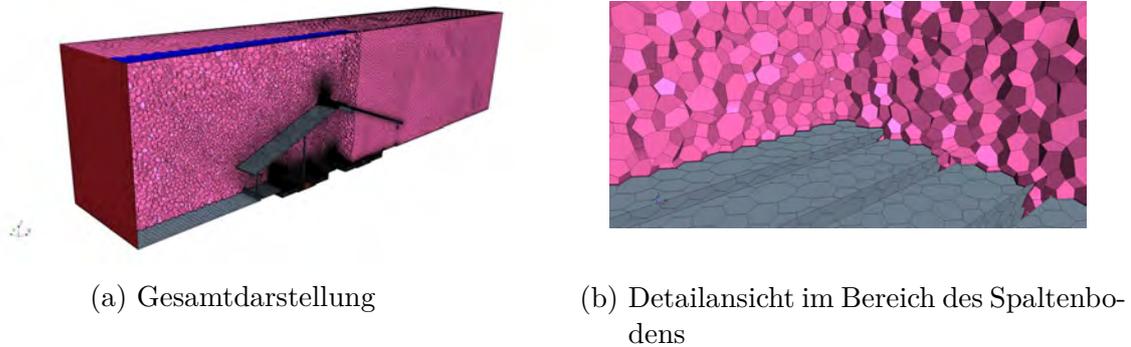


Abb. 8.: Darstellung des Netzes der ersten Geometrie

In den ersten Simulationen (vgl. Abschnitt 5.5.1) hat sich gezeigt, dass diese Vernetzung nicht zu konvergierenden Ergebnissen führt. Es wurden dann der Luftraum sowie die Elementkantenlängen vergrößert, sodass schließlich eine Vernetzung erreicht werden konnte, bei der die Simulation stabil verläuft. Das daraus resultierende geometrische Modell hat eine deutlich geringere Elementzahl von 3.026.268. Es diente dann als Grundlage für die am Segment durchgeführten Simulationen mit erzwungener Konvektion. Einen Vergleich zwischen dem feineren und dem gröberem Netz zeigen die Abbildungen 9a bis 9d.

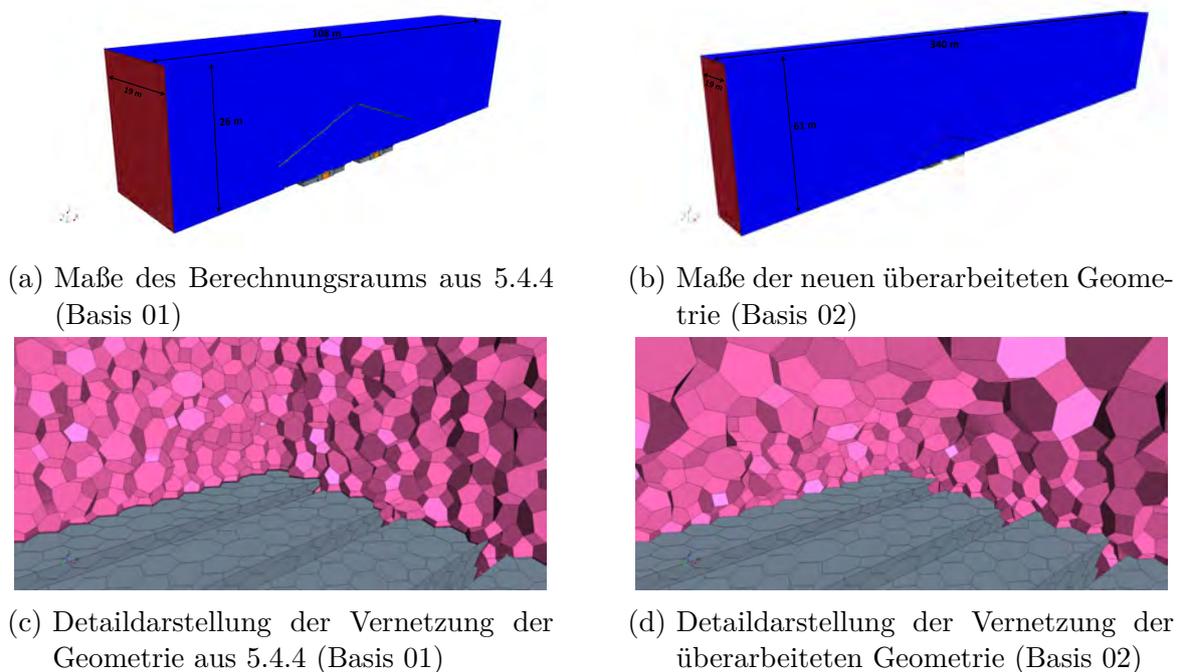
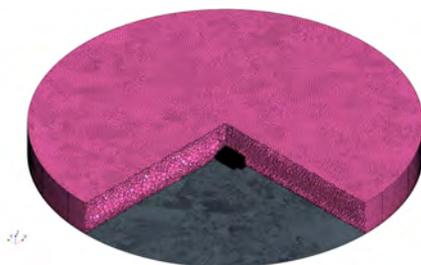


Abb. 9.: Detailvergleich der geometrischen Modelle Basis 01 und Basis 02

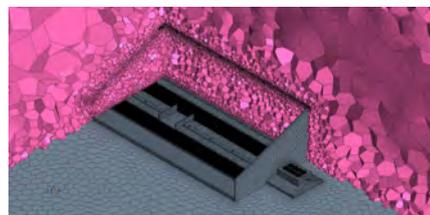
Gesamtstall

Für den Gesamtstall musste der Luftraum auf eine andere Art und Weise gestaltet werden. Da hier auch eine Umströmung des Gebäudes berücksichtigt werden sollte, musste der Luftraum den gesamten Stall umschließen. Um außerdem eine Änderung des Anströmwinkels ohne neue Vernetzung realisieren zu können, wurde der Luftraum analog zu einer Torte aufgebaut, in deren Mittelpunkt sich der Stall befindet. Der Raum wurde in 24 gleich große Sektoren („Tortenstücke“) unterteilt, sodass eine Variation des Anströmwinkels in 15°-Schritten möglich ist. Der Luftraum hat einen Radius von 315 m und eine Höhe von 60 m, um eine ungestörte Umströmung des Gebäudes zu gewährleisten. Hier konnte bereits auf Erfahrungen aus der Berechnung des Segmentes zurückgegriffen werden. Des Weiteren wurde im Gesamtstall auf die Modellierung der Kühe verzichtet. So sollte die Anzahl der Elemente auf ein Maß begrenzt werden, das auch mit dem Großrechner eine gute Antwortzeit ermöglicht. Da der Absaugkanal bereits am Segment hinreichend untersucht worden ist, wurde hier auf dessen Darstellung verzichtet. Auf die genaue Modellierung der Ventilatoren wird in Abschnitt 5.4.5 genauer eingegangen.

Eine Darstellung des geometrischen Modells des Gesamtstalls sowie des erstellten Luftraums findet sich in Abbildung 10. Die Vernetzung ergab für das numerische Modell eine Elementanzahl von 7.120.559 Elementen. Diese Zahl ist deutlich niedriger als zunächst angenommen worden ist (vgl. Abschnitt 5.4.2). Dies liegt vor allem an den nicht modellierten Kühen. Es wird erwartet, dass dies keinen Einfluss auf die Bewertung der Unterflurabsaugung hat. Da es in dieser Fragestellung insbesondere um einen A-B-Vergleich geht, bei dem ein Stallsystem bei unterschiedlichen klimatischen Randbedingungen mit und ohne partieller Unterflurabsaugung betrachtet wird, sollte sich mit und ohne Kühen das gleiche Delta zwischen den Systemen bilden.



(a) Gesamtdarstellung



(b) Detailansicht im Bereich des Stalls ohne Stalldach

Abb. 10.: Darstellung des Netzes und der Rechenumgebung für den Gesamtstall

Segment - natürliche Konvektion

Ausgehend von dem oben erstellten Segmentmodell wurde zunächst ein dreidimensionales Modell für die Berechnung der natürlichen Konvektion erstellt. Aufgrund der sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten werden hier sehr hohe Anforderungen an das Netz und die Solvereinstellungen gestellt. Im Fortgang der Simulationen wurde immer deutlicher, dass in Anbetracht der verbleibenden Projektzeit keine physikalischen Ergebnisse mit einem dreidimensionalen Modell erzielt werden können. Zu groß waren die Abweichungen

der Strömung im Modell zur erwarteten Realität und zu unphysikalisch die Zusammenhänge vor allem an den Rändern der Rechenumgebung. Ein weiterer Faktor war die sehr große Elementanzahl ($> 15.000.000$), die dazu führte, dass Tests und Änderungen in den Randbedingungen oder im Netz nur mit einer langen Antwortzeit durchgeführt werden konnten.

Aus diesen Gründen wurde beschlossen, die Simulationen zur natürlichen Konvektion auf einem zweidimensionalen Schnitt durch den Stall durchzuführen. Hierdurch wurde erwartet, dass durch eine deutlich gesenkte Elementanzahl und der dadurch stark verkürzten Rechenzeit im Rahmen der Projektlaufzeit zu einem Ergebnis gelangt werden kann. Außerdem fand die Betrachtung der Ergebnisse (s. Abschnitt 5.5) meist auf einem zweidimensionalen Schnitt durch die Rechenumgebung statt, sodass dieser als Fläche für die 2D-Simulation verwendet wurde.

Für die Erstellung des Luftraumes musste für das 2D-Modell etwas anders vorgegangen werden als für das 3D-Modell. Ausgehend vom dreidimensionalen Modell des Segmentes wurde dieses so transformiert, dass der entsprechende Schnitt bei $z = 0$ in der x-y-Ebene liegt. Als Schnitt wurde der bei den Ergebnisdarstellungen vom Gesamtstall verwendete Schnitt durch den Stall gewählt. Die Kühe wurden hier als Zylinder modelliert, die ohne die dritte Dimension ein Rechteck in der Rechenumgebung bilden (vgl. Abb. 11). Es wurde auf jeder möglichen Position (Liegeboxen und Laufgang) eine Kuh positioniert, sodass insgesamt zehn Kühe im Stallmodell verweilen. Ansonsten entsprechen die Modellierungen denen der oben beschriebenen.

Eine Kombination aus einem unstrukturierten Polyeder-Netz (automated mesh) und einem strukturierten Quad-Netz (direct mesh) bildet die räumliche Diskretisierung der Rechenumgebung (vgl. Abb. 11). Das Polyeder-Netz modelliert dabei das Stallinnere und die nahe Umgebung, da hier erwartet wird, dass die Strömung stärker in unterschiedliche Richtung fließt. Im übrigen Bereich der Rechenumgebung wird eine entweder senkrechte oder waagerechte Strömung vorherrschen. Hier hat das strukturierte Netz deutliche Vorteile.

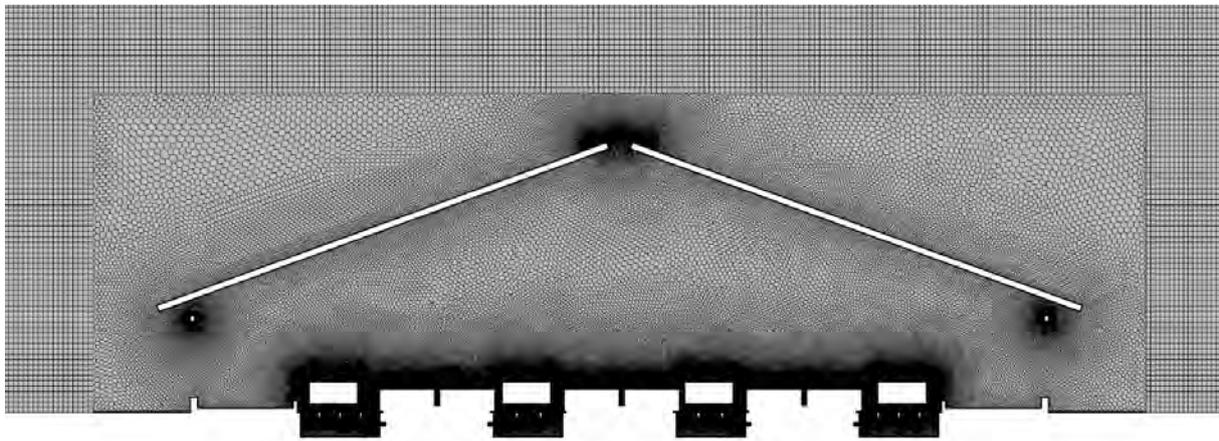


Abb. 11.: Darstellung des Netzes für die Simulation der natürlichen Konvektion

Aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeit ist eine hohe räumliche Auflösung erforderlich. Aus diesem Grund ist in Abbildung 11 auch nur ein Teilbereich der gesamten Rechenumgebung dargestellt. Die Rechenumgebung hat eine Höhe von $h = 121,33\text{ m}$ und eine Breite von $b = 388,98\text{ m}$. Das strukturierte Netz hat eine durchschnittliche Kantenlänge von $l_{quad} \approx 0,38\text{ m}$ und das unstrukturierte von $l_{poly} \approx 0,27\text{ m}$. Dies führt zu einer Elementanzahl von insgesamt 1.530.544 in der Rechenumgebung. Besonders im Bereich

der Kühe ist es sehr wichtig, ein feines Netz mit scharfen Kriterien zu erreichen, da hier der Wärmeübergang von der Oberfläche der Kühe zur Luft berechnet werden muss. Im Bereich der Kühe wird daher ein Netz angestrebt, das ein $y^+ \approx 1$ besitzt. Hierzu muss die Oberfläche der Kühe feiner als bei der erzwungenen Konvektion vernetzt werden, da das y^+ von der Strömungsgeschwindigkeit und der Dicke der ersten Prismenschicht abhängt. Da die Strömungsgeschwindigkeit sehr klein ist, muss auch die Dicke der ersten Prismenschicht entsprechend Formel 5.1 sehr niedrig gewählt werden.

$$y^+(x) = \frac{u_{\tau,x} y_{N,x}}{\nu} \quad (5.1)$$

Hierbei sind $u_{\tau,x}$ die Reibungsgeschwindigkeit an der Stelle x , $y_{N,x}$ die normale Entfernung von der Wand an der Stelle x und ν die kinematische Viskosität des Fluids. Die Reibungsgeschwindigkeit ist dabei unter anderem abhängig von der Umgebungsgeschwindigkeit U_0 . $y_{N,x}$ beschreibt die Dicke der ersten Zelle an der Wand.

5.4.5. Randbedingungen

Nach der Vernetzung müssen die Ränder und Oberflächen Randbedingungen erhalten. Hierdurch werden Ein- und Auslässe sowie Wände oder Interfaces definiert. Außerdem müssen in diesem Schritt beispielsweise Temperaturen oder die Konzentration von Ammoniak auf den Oberflächen vorgegeben werden.

Segment - erzwungene Konvektion

Der Einlass bekommt eine velocity-inlet-Randbedingung, auf der das Geschwindigkeitsprofil $v_x(h)$ als Parabelform aufgeprägt wird (vgl. Formel 5.2). Es wird in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v_{10} in einer Höhe von 10 m berechnet:

$$v_x(h) = v_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^{0,262} \quad (5.2)$$

Der Auslass wird als pressure-outlet dargestellt, bei dem die Bedingung herrscht, dass es keinen relativen Druckunterschied zum Rest der Umgebung (außerhalb des Rechenraumes) gibt. Dies entspricht einem Druck am Auslass von 0 Pa. Die gleiche Randbedingung wird auf die Auslässe der Absaugung im Unterflurbereich aufgeprägt. Die seitlichen Begrenzungen erhalten eine Symmetrie-Randbedingung. Diese simuliert eine Spiegelung des geometrischen Modells zu den Seiten und lässt keine Ströme senkrecht zur Fläche zu. Die obere Begrenzung des geometrischen Modells bekommt ebenfalls eine Symmetrie-Randbedingung. Diese garantiert hier ein stabileres Konvergenzverhalten als ein pressure-outlet. Aufgrund der großen Distanz zwischen dem Stallsegment und dem oberen Rand der Rechenumgebung ist der Einfluss dessen auf die Durchströmung des Stalls vernachlässigbar. Das Fan-Interface für die Modellierung der Ventilatoren wird entsprechend der Kennlinie aufgesetzt. Außerdem wird für die Umlenkleche hinter den Ventilatoren das baffle-Interface genutzt, bei dem die Bleche als Strömungshindernis ohne physikalische Dicke modelliert werden. Alle weiteren Grenzen („boundaries“) werden als adiabate Wände

dargestellt. Auf die Gülleoberfläche sowie die seitlichen und oberen Flächen der Spaltenböden werden NH_3 -Konzentrationen in Form eines konstanten Wertes für den passiven Skalar Ammoniak aufgeprägt. Hierbei wird für alle Oberflächen eine Konzentration von 20 ppm gemäß einer vom 18.09.2018 bis zum 24.09.2018 durchgeführten Messkampagne an der Versuchsanlage in Braunschweig festgelegt (vgl. Abschnitt 5.4.6).

Gesamtstall

Die Ein- und Auslässe werden auf die gleiche Art und Weise wie beim Segment definiert: als velocity-inlet mit parabelförmigem Geschwindigkeitsprofil und pressure-outlet mit 0 Pa. Allerdings ist aufgrund der kreisförmigen Grundfläche des Luftraumes auf die Wahl der Flächen zu achten, da beim Übergang (90° und 270°) jeweils eine Einlass- und Auslassfläche direkt nebeneinander liegen. Dies kann zu numerischen Instabilitäten führen. Durch Testrechnungen konnte herausgefunden werden, dass eine gleichmäßige Aufteilung der Ein- und Auslassflächen nicht numerisch stabil ist. Es ist erforderlich, dass die vier Flächen jeweils auf und über der Mitte auch als velocity-inlet definiert werden, sodass es 15 Flächen als velocity-inlet und neun als pressure outlet gibt (vgl. Abbildung 12).

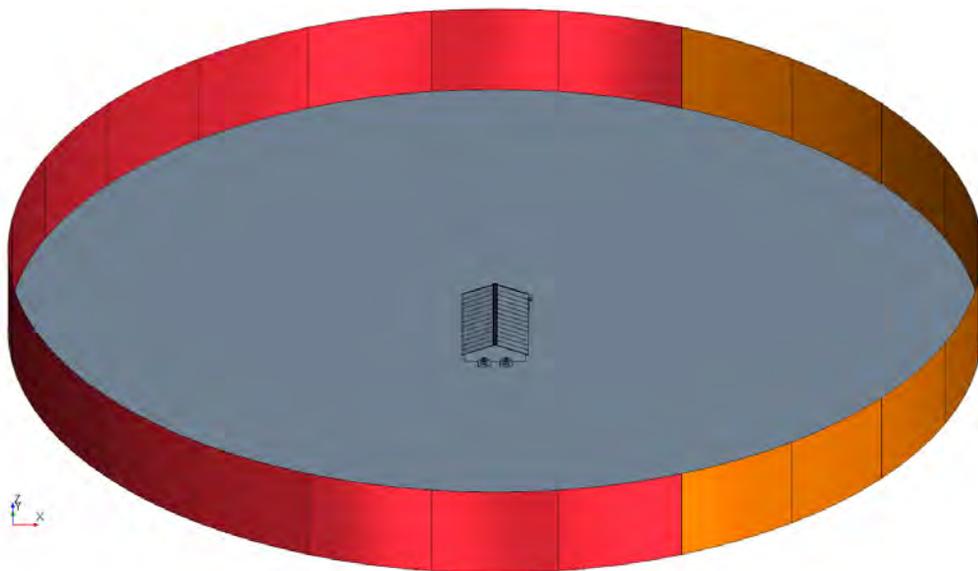


Abb. 12.: Darstellung der Verteilung der Einlässe (rot) und Auslässe (orange) für eine Anströmung senkrecht zum First ($\alpha = 0^\circ$) am Gesamtstall

Da der Absaugkanal in den Simulationen des Gesamtstalls nicht mehr ausmodelliert wurde (vgl. Abschnitt 5.4.4), erfolgte die Darstellung der Ventilatoren als massflow-inlet. Hierbei bekamen die Ventilatoren im Unterflurbereich einen negativen Massenstrom, da sie die Luft aus der Rechenumgebung absaugen. Die Ventilatoren des Filterturms hingegen bekamen einen positiven Massenstrom aufgeprägt, da sie die Luft in die Rechenumgebung hineinblasen. Für die entsprechenden Massenströme mussten dabei die Volumenströme nach Formel 5.3 umgerechnet werden.

$$\dot{m}_i = \rho \cdot \dot{V} \cdot \frac{1}{n_i} \cdot \frac{1}{3600} \quad (5.3)$$

Hierbei ist \dot{V} der jeweilige abgesaugte Volumenstrom in $\frac{m^3}{h}$ und n_i die Anzahl der entsprechenden Ventilatoren ($n_{Absaugung} = 18$, $n_{Filter} = 8$). Da die Simulationen isotherm bei $T_0 = 20^\circ C$ durchgeführt wurden, beträgt die Dichte $\rho = 1,2041 \text{ kg}/m^3$. Für die Massenströme an den einzelnen Ventilatoren ergeben sich dann gemäß Tabelle 3 die entsprechenden Werte als Randbedingungen.

\dot{V} in $\frac{m^3}{h}$	$\dot{m}_{i,Absaugung}$ in $\frac{kg}{s}$	$\dot{m}_{i,Filter}$ in $\frac{kg}{s}$
104 000	-1,94	4,35
118 000	-2,20	4,96
156 000	-2,90	6,52
238 000	-4,42	9,95

Tab. 3.: Resultierender Massenstrom an den Ventilatoren der Absaugung und des Filterturms in Abhängigkeit vom abgesaugten Volumenstrom pro Kanal bei einer Umgebungstemperatur von $T_0 = 20^\circ C$

Zur besseren Verfolgung der Abluftfahne aus dem Filterturm dient ein zweiter passiver Skalar „Abluftfahne“, der an den Ventilatoren vom Filter mit dem Wert 1 und sonst mit 0 initialisiert wird. Alle weiteren Ränder und Wände wurden analog zum Modell des Segments für die erzwungene Konvektion definiert.

Segment - natürliche Konvektion

Aufgrund der Strömungssituation ist es hier nicht erforderlich, einen Einlass zu definieren. Die Ränder in x-Richtung wurden als Wand definiert und der obere Rand als pressure outlet mit der Bedingung 0 Pa , sodass eine große Box entsteht. Dies unterstützt die Stabilität der Simulation. Um die Realität vollständig abbilden zu können, müssten die beiden Ränder in x-Richtung auch als pressure outlet definiert werden. Dies hätte aber zur Folge, dass es dann immer zwei Flächen im Winkel von 90° gibt (jeweils ein Rand in x-Richtung mit der oberen Begrenzung). Dies ist vor allem bei Simulationen von natürlicher Konvektion zu vermeiden, da es zu großen Instabilitäten führen kann, sodass die Rechnung nicht konvergieren würde.

Als Zustandsgleichung wurde ein inkompressibles ideales Gas verwendet. Hierdurch wird im Solver automatisch die Änderung des statischen Druckes aufgrund der Gravitation in der Rechenumgebung berücksichtigt.

Die Oberfläche der Kühe wurde mit einer konstanten Temperatur von $T_{Kuh} = 38,5^\circ C$ beaufschlagt. Diese Temperatur liegt im Bereich der Körpertemperatur einer gesunden laktierenden Kuh (Landwirt.com GmbH (2009), DLG AgroFood Medien GmbH (2019)). Dennoch wurden hier einige Vereinfachungen vorgenommen. Die Kühe bestehen im Modell nur aus dem Rumpf und nicht aus verschiedenen Körperteilen, die einzeln angesteuert werden könnten, sodass die gesamte Oberfläche mit der Temperatur versehen wurde. Darüber hinaus verwendet die Simulation kein Modell zur Berücksichtigung des Temperaturübergangs über Haut und Haare von der Kuh zur Luft. Dies wäre mit deutlich mehr Modellierungsaufwand verbunden gewesen. Außerdem hätte die Verwendung eines solchen Modells möglicherweise zu einem gedämpfteren Übergang geführt, wodurch zum einen noch höhere Anforderungen an die Vernetzung in diesem Bereich gestellt worden wären (aufgrund des weiter gesenkten Temperaturunterschiedes und der damit niedrigeren Strömungsgeschwindigkeit), sodass die Elementanzahl des Modells deutlich gestiegen

wäre. Zum anderen würde ein gedämpfterer Übergang zu einem geringeren Temperaturgradienten insgesamt führen. Hierdurch würde die gesamte Simulation numerisch instabiler werden. Eine Festlegung der Temperatur ohne dezidierte Übergangsfunktion von Kuh zur Luft führt daher eher zu einer Überbewertung der Wärmeproduktion im Stall. Dadurch entsteht eventuell eine zu starke Auftriebsströmung, sodass die Leistungsfähigkeit der partiellen Unterflurabsaugung, die gegen die Auftriebsströmung arbeiten muss, unterschätzt wird. Eine Unterschätzung der Anlage ist vorteilhafter, da die Erwartungen in der Realität eher erfüllt werden.

Die Wahl des Turbulenzmodells fiel erneut auf das k - ϵ -Modell, da der Bereich freier Strömung viel größer als die Oberfläche der Kühe ist.

Zur Überprüfung, ob es sich im Betrieb mit der partiellen Unterflurabsaugung überhaupt um einen Fall natürlicher Konvektion handelt oder ob der Anteil erzwungener Konvektion überwiegt, wird die Richardson-Zahl herangezogen. Sie beschreibt das Verhältnis von den Auftriebskräften zu den Trägheitskräften eines Fluids im Schwerfeld. Sie ist definiert als:

$$Ri = \frac{g \cdot Be \cdot L \cdot dT}{u^2} \quad (5.4)$$

Hierbei sind g die Gravitationskonstante, Be der Wärmeausdehnungskoeffizient, der für ideale Fluide $Be = 1/T$ mit der Temperatur T in Kelvin beträgt, L eine charakteristische Länge, dT der absolute Temperaturunterschied in der Rechenumgebung und u die Strömungsgeschwindigkeit in m/s . Für Werte $Ri < 0,1$ können die Auftriebskräfte vernachlässigt werden. Für $Ri > 10$ dominieren sie hingegen den Strömungszustand, sodass von reiner natürlicher Konvektion ausgegangen werden kann. Zwischen diesen beiden Grenzwerten liegen beide Kräfte vor und müssen berücksichtigt werden. Da im Vorfeld die Geschwindigkeit u nicht bekannt ist, muss der Bereich bestimmt werden, für welche Geschwindigkeiten welche Kräfte dominieren. Hierzu werden die entsprechenden Größen eingesetzt. Als L wird der Durchmesser der Kuhkörper verwendet. Dies führt zu:

$$Ri = \frac{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1}{311,65 K} \cdot 1 m \cdot 33,5 K}{u^2} \approx \frac{1,0545 \frac{m^2}{s^2}}{u^2} \quad (5.5)$$

Daraus folgt, dass die Richardson-Zahl den Wert $Ri = 0,1$ für eine Geschwindigkeit von $u \approx 3,25 m/s$ und den Wert $Ri = 10$ für eine Geschwindigkeit von $u \approx 0,33 m/s$ annimmt. Da in der Simulation mit partieller Unterflurabsaugung eine Geschwindigkeit am Absaugschlitz von $u_{Absaugung} = 1 m/s$ vorgegeben worden ist, wird die resultierende Geschwindigkeit am Kuhkörper zwischen den beiden zuvor ermittelten Grenzwerten liegen, sodass kein eindeutiger Fall von natürlicher oder erzwungener Konvektion entsteht.

Aufgrund dieser Unsicherheit wurde für die Berechnungen mit und ohne Absaugung auf die two-layer-Formulierung von Xu (Buoyancy-driven) zurückgegriffen, die bei Strömungen genutzt wird, bei denen die Auftriebskräfte dominieren.

5.4.6. Messkampagne an der Versuchsanlage in Braunschweig

Vom 18.09.2018 bis zum 24.09.2018 wurde eine Messkampagne an der Versuchsanlage in Braunschweig durchgeführt. Primäres Ziel war die Ermittlung der Ammoniakkonzentration direkt über der Gülle, um diese als Randbedingung in der Simulation zu verwenden. In dem Stall waren zum Zeitpunkt der Messungen 80 Tiere untergebracht. Die zwei Auf-

enthaltbereiche sind durch einen planbefestigten Futtergang voneinander getrennt. Die Liegeboxen sind eingestreut und die Kühe laufen auf Spaltenbödenelementen. Außerdem haben sie Zugang zu einer Weide. Einen Blick in den Stall mit bereits installierter Messtechnik bietet Abbildung 13.



Abb. 13.: Blick in den Kuhstall mit befestigter Messeinrichtung

Unter dem Spaltenboden befinden sich die Güllekanäle. Die Art der Ausführung unterscheidet sich allerdings leicht von der im Simulationsstall. Im Messstall verlaufen parallel zum Futtergang drei Güllekanäle auf jeder Stallseite im Unterflurbereich. Die Trennung erfolgt durch Betonwände, die aber nicht bis zum Spaltenboden reichen. Dadurch sind die Kanäle nicht vollständig voneinander getrennt, sodass es beim Spülen vereinzelt zum Überlaufen und Mischen der Kanäle kommen kann (Hackelsperger (2018)). Trotz der Unterschiede im Unterflurbereich und der Anzahl der Tiere im Stall eignen sich die Ergebnisse der Ammoniakmessungen dennoch, um einen guten Anhaltspunkt für die NH_3 -Konzentration in der Luft direkt über der Gülle zu geben. Die NH_3 -Konzentration in der Luft hängt dabei von einigen wesentlichen Parametern ab (vgl. Wirtschafts- und Sozialrat Wirtschaftskommission für Europa (2014)). Besonders ist hier die Temperatur zu nennen. Je höher die Luft- oder Gülletemperatur, desto höher ist auch die Konzentration von Ammoniak. Darüber hinaus hat die Windgeschwindigkeit an der Gülleoberfläche einen starken Einfluss auf die Emission von Ammoniak aus dem Stall. Je höher die Geschwindigkeit, desto höher die Emission. Des Weiteren hängt die Emission auch von der Größe der verschmutzten Oberfläche ab. Durch die zusätzliche Trennung des Unterflurbereiches in drei Bereiche ist die verschmutzte Fläche hier sogar größer als im Simulationsstall, da an den Trennwänden ebenfalls Kot und Urin haften.

Zur Messung der NH_3 -Konzentration im Unterflurbereich wurde ein opto-akustisches Gasmessgerät der Firma LumaSense Technologies GmbH verwendet. Damit die Kühe die Installation über die Dauer der Messkampagne nicht zerstören, wurde das Messgerät in einer Box außerhalb der Reichweite der Kühe positioniert (vgl. Abb. 13). Über ein Edelstahlrohr wurde der PTFE-Messschlauch in den Unterflurbereich geführt, um die Messungen

durchführen zu können (vgl. Abbn. 13 und 63). Darüber hinaus wurde zusätzlich die Ammoniakkonzentration in der Luft gemessen. Dies geschah mit einem Polytron C300 der Firma Dräger. Das Messgerät wurde an die oben erwähnte Box gehängt (vgl. Abb. 62). Der CO_2 -Gehalt und die Temperatur und Feuchte der Luft innerhalb und außerhalb des Stalls wurden ebenfalls erfasst. Für die CO_2 -Messungen innerhalb des Stalls wurde ein Messgerät auf der aufgehängten Box (vgl. Abb. 13) und eines in der Nähe des Futterautomaten (vgl. Abb. 64) platziert. Auf der Box wurde ebenfalls die Temperatur und Feuchte in der Stallluft gemessen. Im Außenbereich wurden die Messgeräte für CO_2 , Temperatur und Feuchte an einer geschützten Stelle positioniert (vgl. Abb. 65). Eine Übersicht der verwendeten Messgeräte sowie der spezifischen Messintervalle bietet Tabelle 4.

Parameter	Messgerät	Messintervall
NH_3 Stallluft	Polytron C300 (Fa. Dräger)	1 min
NH_3 über Gülle	INNOVA 1302 (Fa. LumaSense Technologies GmbH)	10 min
Lufttemperatur und Luftfeuchte	HumiLog (Fa. Driesen + Kern GmbH)	1 min
CO_2 -Gehalt Luft	CFM 7160 (Fa. Figaro)	1 min

Tab. 4.: Übersicht über die verwendete Messtechnik zur Messung verschiedener Parameter im Kuhstall

Die Messwerte wurden kontinuierlich in dem oben genannten Messzeitraum aufgenommen. Die Messung von Ammoniak in der Stallluft konnte allerdings aufgrund der Akku-Laufzeit des Messgerätes nicht über die gesamte Messdauer erfolgen, sondern brach nach 3,5 Tagen in der Nacht vom 21.09.2018 auf den 22.09.2018 ab.

In Abbildung 14 ist der zeitliche Verlauf der NH_3 -Konzentration über der Gülle sowie der Temperaturverlauf im Innen- und Außenbereich des Stalls aufgetragen.

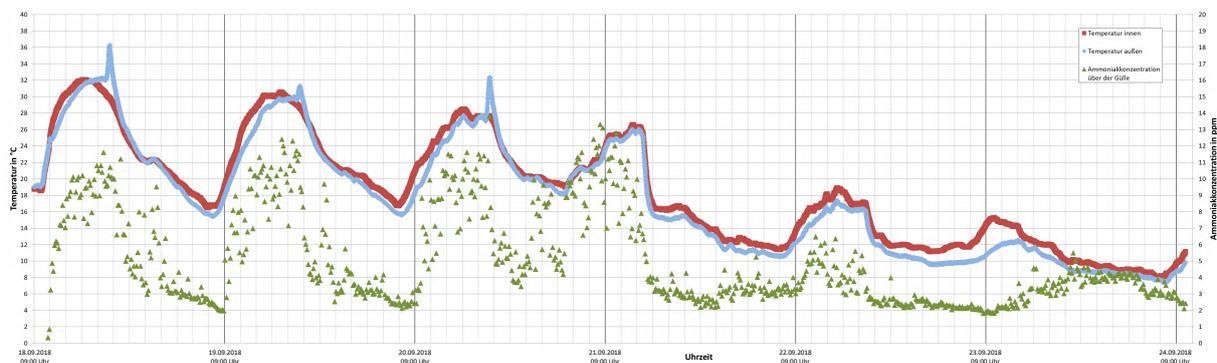


Abb. 14.: Zeitlicher Verlauf von Innen- und Außentemperatur sowie der NH_3 -Konzentration über der Gülle

Die Innen- und Außentemperaturen bewegen sich fast parallel mit einem kleinen Versatz über die Messperiode. Die Peaks in der Außentemperatur in den Abendstunden zeigen, dass die Messposition zu dieser Zeit in der Sonne lag. Die maximale Temperatur im Innenraum betrug während der Messkampagne $32,1^\circ C$, außerhalb des Stalls $36,3^\circ C$. Die Minima lagen im Stall bei $8,0^\circ C$ und im Außenbereich bei $7,4^\circ C$. Während der ersten drei Tage des Messzeitraums herrschten tagsüber hochsommerliche Temperaturen, die im letzten Drittel aufgrund eines durchziehenden Regengebietes deutlich absanken. Die

Ammoniakkonzentration in der Luft über der Gülle folgte in ihrem Verlauf den Temperaturverläufen. Dies bestätigt die oben genannten Abhängigkeiten aus der Literatur. Das Maximum der NH_3 -Konzentration lag im Messzeitraum bei gemessenen 13,8 ppm, das Minimum bei 0,3 ppm. Dies zeigt, dass die Annahme von 20 ppm Ammoniak über der Gülle für die Simulationen legitimiert ist. Hierdurch wird die Verteilung eher über- als unterbewertet, wodurch die Auslegung der Absaugung für ein worst-case-Szenario durchgeführt wird. Außerdem wird in der Simulation die NH_3 -Konzentration direkt auf der Gülle und nicht 10 cm darüber angegeben. Daher ist ein höherer Wert auch aus diesem Grund anzunehmen.

Die zeitlichen Verläufe der weiteren gemessenen Größen finden sich in den Abbildungen 68 bis 71 im Anhang. Da sie im Projekt nicht näher behandelt worden sind, wird auf sie an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

5.5. AP 5 (AT): Berechnung der Luftströmung und der damit verbundenen Emissionsfrachten

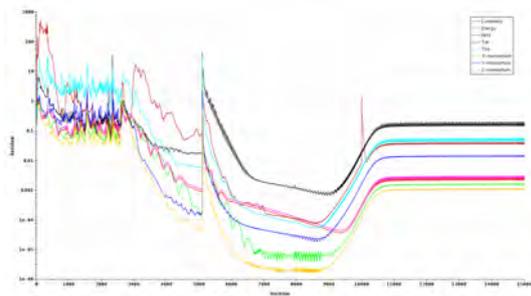
In diesem Abschnitt wird auf die erzielten Berechnungsergebnisse der Simulationen eingegangen. Sie bilden das Kernstück dieser Untersuchung und dienen als Grundlage zur Bewertung der Wirksamkeit einer partiellen Unterflurabsaugung in einem natürlich belüfteten Rinderstall hinsichtlich der Minderung der Ammoniakemissionen und der damit verbundenen Steigerung des Tierwohls. Die entscheidende Größe in der Betrachtung waren hier die Ammoniakemissionen aus dem Stall. Sie dienen als objektiver Vergleichswert zwischen den einzelnen Varianten und veranschaulichen die Wirksamkeit der partiellen Unterflurabsaugung unabhängig von verschiedenen Randbedingungen. Durch eine Senkung der Emissionen wird erwartet, dass aufgrund der natürlichen Belüftung die Schadgaskonzentration im Stallinneren niedriger ist als bei einer Konfiguration mit höheren Ammoniakemissionen. So kann eine Aussage auch zur Steigerung des Tierwohls getroffen werden.

Zunächst werden die Ergebnisse vom Segment bei erzwungener Konvektion vorgestellt. Anschließend stellt Abschnitt 5.5.2 die Resultate aus den Berechnungen am Gesamtstall vor. Abschließend wird auf die Simulationen der natürlichen Konvektion eingegangen.

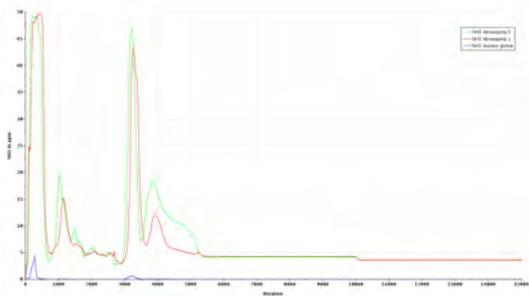
5.5.1. Segment - erzwungene Konvektion

Als erste Simulation wurde das in Abschnitt 5.4.4 aufgebaute Modell berechnet. Hierfür wurde in 10 m Höhe nach Formel 5.2 eine Windgeschwindigkeit von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ festgelegt. Die Drehzahl aller Ventilatoren wurde auf eine mittlere Drehzahl von 800 rpm gesetzt.

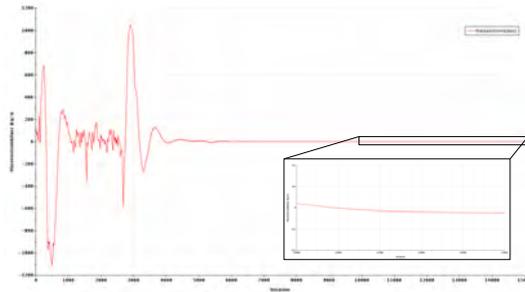
Die Residuen und Ammoniakkonzentrationen der auf dieser Geometrie aufbauenden Rechnung sind in den Abbildungen 15a und 15b nach 15.000 Iterationen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Verläufe auskonvergiert sind. Die Residuen sind auf einem leicht erhöhten Niveau. Um dies einzuordnen, wird unter anderem die Massenstrombilanz (Abb. 15c) betrachtet. Sie konvergiert zu dem geforderten Wert von 0 kg/s und schwingt in einem vernachlässigbaren Bereich.



(a) Verlauf der Residuen



(b) Verlauf der Ammoniakkonzentration an den Auslässen



(c) Verlauf der Massenstrombilanz über Ein- und Auslässe

Abb. 15.: Verlauf verschiedener Konvergenzparameter über den Iterationen von Basis 02

Zusätzlich wird das Simulationsergebnis auf unphysikalische Vorgänge untersucht. Dies wären beispielsweise sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten an spezifischen Stellen oder unrealistische Temperatur- oder Druckverteilungen. Letztere ist in Abbildung 16 für den Mittelschnitt (Schnitt durch die Rechenumgebung in der Mitte bezogen auf y) in Relation zum Umgebungsdruck ($0 Pa$) dargestellt.

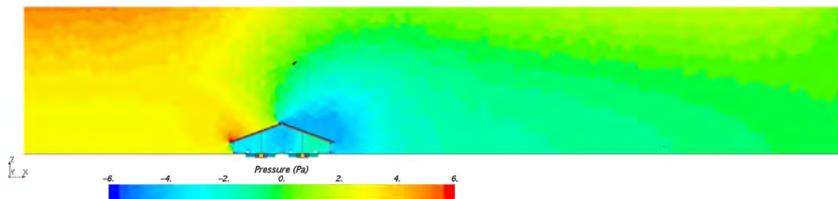


Abb. 16.: Konturplot des Druckes im Mittelschnitt Basis 02

Stromauf des Stalls bildet sich aufgrund des Strömungswiderstandes des Gebäudes ein Staudruckgebiet, das im Staupunkt (Traufe auf der windzugewandten Seite) sein Maximum hat. Stromab des Stalls nähert sich der Druck mit steigender Entfernung wieder dem Umgebungsdruck an. Unmittelbar hinter dem Stall bilden sich Rückströmungsgebiete, die durch einen besonders niedrigen Druck in Relation zur Umgebung gekennzeichnet sind. Aufgrund der Geometrie des Stalls zeigt sich im Stall ein gegensätzliches Verhalten: in Strömungsrichtung weitet sich zunächst der Querschnitt, sodass der Druck abnimmt. Stromab des Firstes verengt sich der Querschnitt, sodass sich nun im Stallinneren ein Staudruckgebiet bildet. Auch im Unterflurbereich treten die erwarteten Druckverteilungen auf. Unterhalb des Spaltenbodens ist der Druck etwas geringer als oberhalb, sodass sich die Strömung in Richtung Güllekeller und Absaugung bewegt. Der Druck im Absaugkanal ist deutlich höher, da die Strömung durch die Ventilatoren eine Druckerhöhung

erfährt. Insgesamt zeigt die hier dargestellte Druckverteilung die erwarteten Phänomene auf.

Zusätzlich zur Beurteilung der physikalischen Plausibilität der Rechnung wird die Geschwindigkeitsverteilung betrachtet (Abbildung 17).

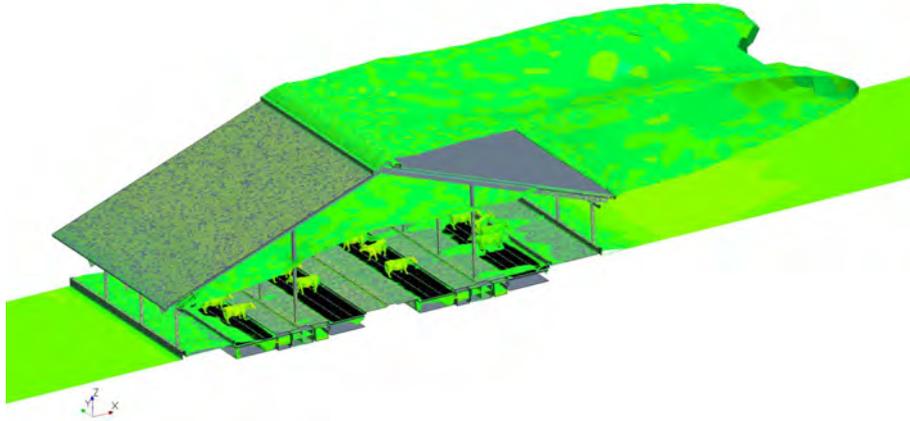


Abb. 17.: Iso-Fläche für $v_x = 0 \text{ m/s}$ für Basis 02

Sie ist hier als Iso-Fläche mit dem Wert $v_x = 0 \text{ m/s}$ dargestellt. So kann schnell erkannt werden, in welchen Bereichen die x-Komponente der Geschwindigkeit entgegen der Strömungsrichtung gerichtet ist (Werte $< 0 \text{ m/s}$, innerhalb der Iso-Fläche) und wo die Komponente in Strömungsrichtung gerichtet ist (Werte $> 0 \text{ m/s}$, außerhalb der Iso-Fläche). Auf diese Art und Weise könnten unphysikalische Rückströmungsgebiete leichter entdeckt werden.

Prinzipiell spiegelt sich der Druckverlauf in der Iso-Fläche wieder. Zusätzlich können hier noch besser Gebiete mit lokaler Rückströmung ausgemacht werden. So bildet sich beispielsweise aufgrund der Kante am windzugewandten Futtertisch fast über die gesamte Breite ein Rückströmungsgebiet.

Die Gleichmäßigkeit der Absaugung im Unterflurbereich kann über ein Schlierenbild, auf dem die Geschwindigkeitsverteilung als skalare Größe abgebildet ist, beurteilt werden. Eine entsprechende Darstellung findet sich in Abbildung 18.

Hier ist zu erkennen, dass die Ventilatoren sehr gleichmäßig über die Segmente absaugen. Dies ist ein positives Ergebnis. Es wurde befürchtet, dass die Absaugung hauptsächlich über die Schlitze erfolgt, die dem Ventilator direkt gegenüber liegen, sodass eher eine punktförmige als eine linienförmige Absaugung erfolgen würde.

Die Lage der Güllekanäle relativ zur Anströmung sorgt allerdings für eine ungleichmäßige Absaugung über der Gülle. In den Güllekanälen 1 und 3 bildet sich ein Wirbel, der der Absaugung entgegengesetzt ist. Genau andersherum verhält es sich in den Güllekanälen 2 und 4. Hier wird die Absaugung durch die Wirbelbildung unterstützt. Die Stromlinien in der folgenden Abbildung 19 veranschaulichen dieses Phänomen.

In den Güllekanälen 2 und 4 wird aufgrund des Wirbels auf der gesamten Breite des Kanals abgesaugt. In den Kanälen 1 und 3 bildet sich im linken Bereich ein großer Wirbel, der etwa $2/3$ bis $3/4$ der Kanalbreite in Anspruch nimmt. Daher wird hier die Luft nicht über die gesamte Breite des Kanals abgesaugt. Es ist allerdings auch zu erkennen, dass die zur Absaugung strömende Luft eine Art Barriere baut, durch die die Luft nicht wieder in den Oberflurbereich treten kann, sodass hier dennoch die gewünschte Wirkung erzielt werden kann.

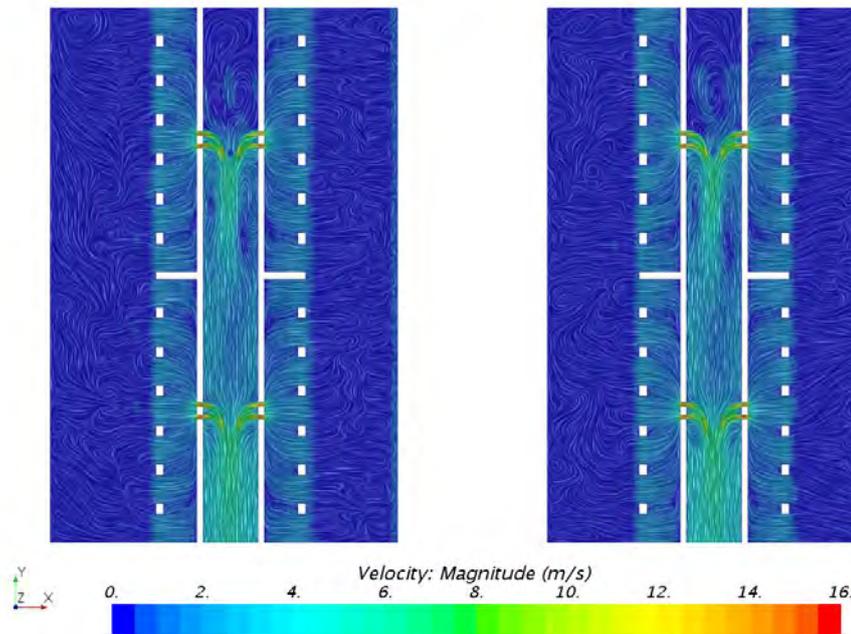


Abb. 18.: Schlierenbild mit Geschwindigkeitsverteilung im Unterflurbereich ($z = -0.55 \text{ m}$) Basis 02 in den Güllekanälen 1 - 4 (von links nach rechts)

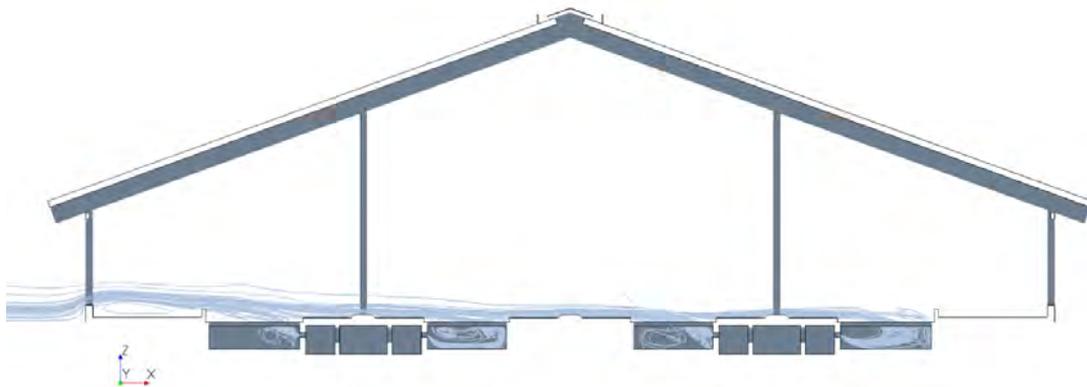


Abb. 19.: Darstellung der Stromlinien in den Güllekanälen Basis 02

Es wurde nun versucht, die Absaugung der Kanäle 1 und 3 so einzustellen, dass trotzdem mehr über die Breite abgesaugt wird. Daher wurden für die Anströmung von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ verschiedene Drehzahleinstellungen der Ventilatoren berechnet. Neben der bereits vorgestellten gleichmäßigen Drehzahl von je 800 rpm pro Ventilator ($\dot{V} = 172.000 \text{ m}^3/h$) wurde diese Verteilung auch für die maximale Drehzahl von 1.600 rpm ($\dot{V} = 345.000 \text{ m}^3/h$) 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 ($\dot{V} = 151.000 \text{ m}^3/h$) und als weitere Konfiguration 1.200 rpm für die Kanäle 1 und 3 und 900 rpm für die Kanäle 2 und 4 ($\dot{V} = 226.000 \text{ m}^3/h$). Die in den Klammern angegebenen Volumenströme geben hierbei den bereits auf den gesamten Stall hochskalierten Volumenstrom pro Absaugkanal an. Eine Darstellung aller vier Varianten findet sich in den Abbildungen 20a bis 20d.

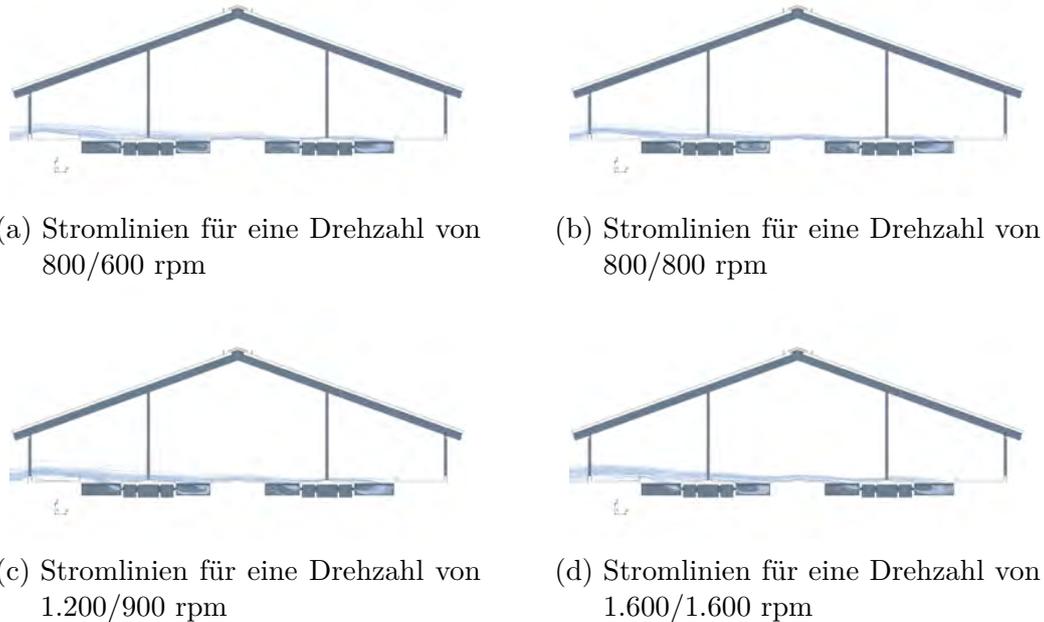


Abb. 20.: Vergleich der Stromlinien im Unterflurbereich für verschiedene Ventilator-drehzahlen bei einer Anströmung von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$

Es lassen sich kaum Veränderungen im Strömungsbild erkennen. In Güllekanal 3 nehmen die Verwirbelungen bei einer Drehzahl von 1.600 rpm (Abb. 20d) ab. Für den Güllekanal 1 strömt die Luft mit steigender Drehzahl auf direkterem Weg in das Absaugsegment. Das Totwassergebiet hinter der Kante vom Futtertisch wird dadurch größer. Allerdings wird auch der Druckgradient größer, sodass es der Luft deutlich mehr erschwert wird, wieder in den Oberflurbereich zurückzukehren. Für die Kanäle 2 und 4 gibt es kaum Unterschiede im Verlauf der Stromlinien bei unterschiedlichen Ventilator-drehzahlen. Dies lässt zunächst den Schluss zu, dass eine Variation der Ventilator-drehzahl nur einen geringen Effekt auf die Strömungsführung im Unterflurbereich hat. Beim Blick auf das Emissionsminderungspotential wird allerdings deutlich, dass erwartungsgemäß mit einer erhöhten Drehzahl auch eine stärkere Minderung des NH_3 -Massenstroms aus dem Stall gelingt (vgl. Abb. 22).

Zusätzlich zur Variation der Ventilator-drehzahl wurde für den Fall einer Anströmung von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ eine Konfiguration ohne Unterflurabsaugung simuliert. Ein Vergleich der Ammoniakkonzentration im Stallgebäude mit und ohne Unterflurabsaugung findet sich in den Abbildungen 21a und 21b.

Die Variante mit Unterflurabsaugung hat eine Ventilator-drehzahl von 1.200 rpm und 900 rpm in den entsprechenden Güllekanälen (s. o.). Der Volumenstrom ist hochskaliert für den Gesamtstall und gilt pro Kanal. Es ist zu erkennen, dass in dem Stall ohne Absaugung die Ammoniakkonzentration in Strömungsrichtung stark ansteigt. 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 sie sich mit Ammoniak aus der Gülle angereichert. Die partielle Unterflurabsaugung in Abbildung 21b verhindert bei gleicher Anströmung, dass so hohe Konzentrationen im Oberflurbereich entstehen. Die einströmende Luft taucht hier zwar auch in den Güllekeller ab, wird aber durch die Absaugung fast vollständig im Unterflurbereich gehalten, da sich zwischen Ober- und Unterflurbereich ein negativer Druckgradient gebildet hat.

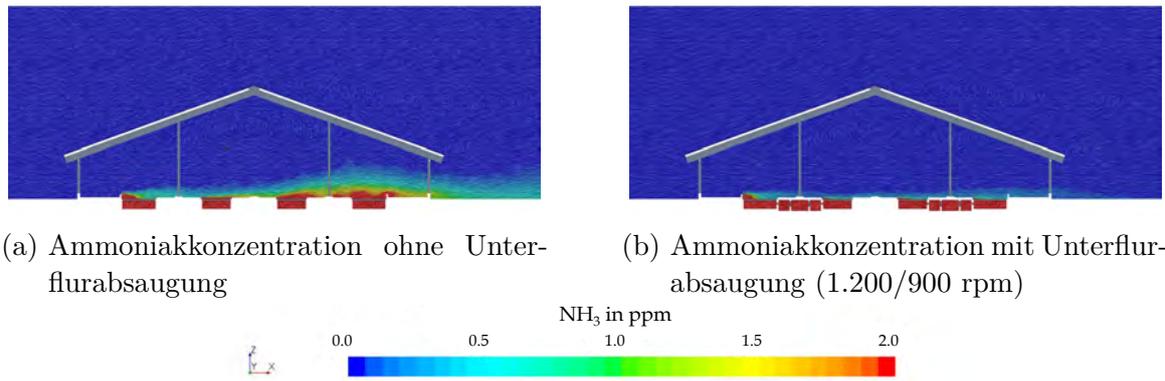


Abb. 21.: Vergleich der NH_3 -Konzentration im Stall ohne und mit partieller Unterflurabsaugung bei einer Anströmung von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 226\,000 \text{ m}^3/\text{h}$

Zur weiteren Auswertung wurde der Ammoniakmassenstrom an den Schnittstellen des Stalls zur Umwelt verglichen. Dieser lässt sich nach Formel 5.6 über den Volumenstrom \dot{V} der Luft in m^3/h und der Konzentration von Ammoniak C_{NH_3} in kg/m^3 berechnen.

$$\dot{m}_{NH_3} = \dot{V} \cdot C_{NH_3} \quad (5.6)$$

Die Konzentration von Ammoniak wird zunächst in der Einheit ppm ausgegeben. Dies lässt sich nach Formel 5.7 in eine Dichte mit der Einheit kg/m^3 umrechnen.

$$C_{NH_3} = \frac{m_{NH_3}}{V_{NH_3} + V_{Luft}} = \frac{M_{NH_3} \cdot \frac{N_{NH_3}}{N_A}}{V_m \cdot \frac{N_{NH_3}}{N_A} + V_m \cdot \frac{N_{Luft}}{N_A}} \quad (5.7)$$

Hierin sind M_{NH_3} die Molmasse von Ammoniak ($\approx 0,01703 \text{ kg/mol}$), N_{NH_3} die Anzahl der Teilchen Ammoniak in einer Million Teilchen (ppm), N_A die Avogadro-Konstante ($\approx 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$), V_m das molare Volumen ($\approx 0,02404 \text{ m}^3/\text{mol}$ bei 20°C) und $N_{Luft} = 1.000.000 - N_{NH_3}$ die Anzahl der Teilchen der Luft. Hiermit ergibt sich beispielsweise, dass eine Konzentration von 20 ppm Ammoniak in der Stallluft $14,168 \text{ mg}/\text{m}^3$ entspricht.

Die oben beschriebenen Rechnungen wurden außerdem für zwei weitere Anströmgeschwindigkeiten simuliert. Die Plausibilisierung und Bewertung der Simulationen wurde auf die gleiche Art und Weise ausgeführt. In Abbildung 22 sind die Ergebnisse für das Segment relativ zu der Simulation ohne partielle Unterflurabsaugung bei einer Windgeschwindigkeit von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ dargestellt.

Die Absaugvolumenströme sind hier hochskaliert auf den Gesamtstall und gelten pro Kanal. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Leistung der Ventilatoren im Unterflurbereich weniger Ammoniak in die Umwelt gelangt. Dies liegt an der Steigerung des negativen Druckgradienten, sodass weniger mit Ammoniak belastete Luft aus dem Güllekeller in den Oberflurbereich strömt. Bei konstanter Absaugleistung und steigender Anströmgeschwindigkeit steigt aufgrund von Gleichung 5.6 der Massenstrom in die Umwelt, da der Volumenstrom durch den Stall ansteigt und die Konzentration von Ammoniak aber auf einem ähnlichen Niveau verharrt.

Die hier aufgezeigten Werte stellen das theoretische Potential der partiellen Unterflurabsaugung in einem frei belüfteten Rinderstall dar. Mit steigender Absaugleistung steigt beispielsweise auch der Energieverbrauch der Anlage, sodass stetig ein Kompromiss zwi-

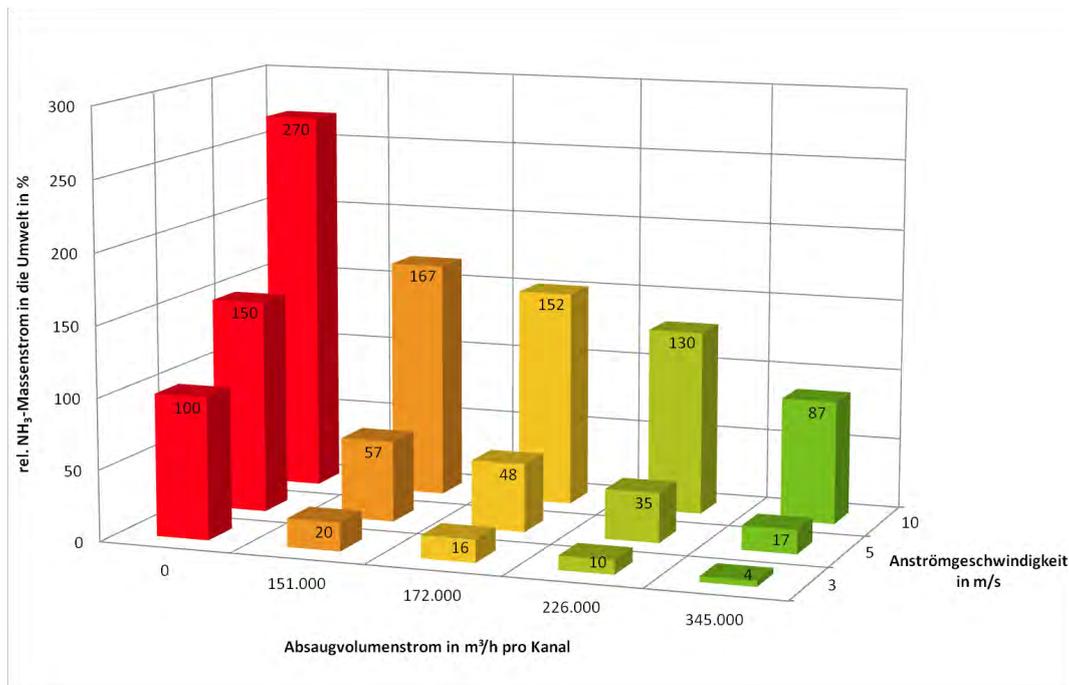


Abb. 22.: Balkendiagramm zur Darstellung des relativen Ammoniakmassenstroms in die Umwelt eines frei belüfteten Rinderstalls mit und ohne partieller Unterflurabsaugung bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten v_{10} und Absaugvolumenströmen

sehen Umweltbelastung durch Energieverbrauch oder Emission aus dem Stall eingegangen werden muss. Ferner steigt mit der Absaugleistung auch die Wäscherbelastung, sodass hier möglicherweise öfter Waschwasser gewechselt werden muss oder die maximale Reinigungsleistung erreicht wird. Dennoch lässt sich an diesen wenigen Simulationen bereits die enorme Wirksamkeit einer partiellen Unterflurabsaugung in Bezug auf die Ammoniakemissionen eines frei belüfteten Rinderstalls zeigen.

5.5.2. Gesamtstall

Nach der Fertigstellung des numerischen Modells für den Gesamtstall musste dieses zunächst validiert werden, welches im folgenden Abschnitt erläutert wird. Anschließend wird auf die weiteren Berechnungsergebnisse, die mit dem Modell des Gesamtstalls erzielt wurden, eingegangen.

Validierung des Gesamtstalls

Die Validierung des Gesamtstalls geschah durch einen Vergleich zum Segment zunächst für eine Simulation mit einer Anströmgeschwindigkeit von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ und ohne partielle Unterflurabsaugung. Die Auswertung des Ammoniakmassenstroms auf der windabgewandten Seite erfolgte beim Gesamtstall auf der Fläche, die der des Segments entspricht (vgl. Abbildung 6). Ebenso wurde für die in den folgenden Abbildungen dargestellten Schnittflächen jeweils der gleiche y-Schnitt verwendet.

In Abbildung 23 ist der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit im Schnitt des Segmentes und des Gesamtstalls als Schlierenbild dargestellt.

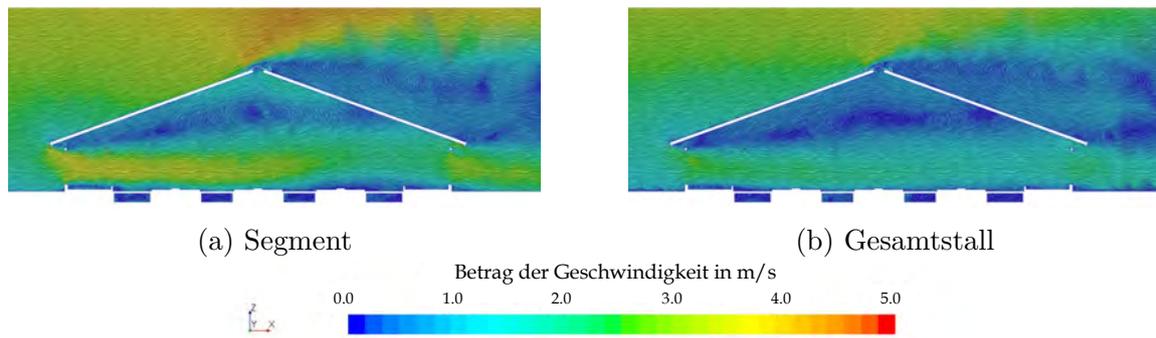


Abb. 23.: Darstellung des Schlierenbildes und der Geschwindigkeitsverteilung auf dem gleichen y -Schnitt am Segment und dem Gesamtstall bei einer Anströmung von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ ohne partielle Unterflurabsaugung

Zwischen beiden Fällen ergeben sich deutliche Unterschiede in den Geschwindigkeiten, die sich im Stall, aber auch darum herum ausbilden. Dies hängt mit den gewählten Randbedingungen der begrenzenden Wände im Segment zusammen. Hier sind die Begrenzungen der Rechenumgebung in y -Richtung und in $+z$ -Richtung als symmetry-wall ausgeführt. Diese Bedingung lässt keine Strömung senkrecht zur Wand zu. Dies führt dazu, dass der gesamte Volumenstrom, der in die Rechenumgebung eintritt, diese nur hinten wieder verlassen und er folglich nicht zur Seite ausweichen kann. Es muss also aufgrund der Querschnittsverengung eine Beschleunigung der Strömung erfolgen. Dies ist im Modell für den Gesamtstall anders. Hier wurde auch die Umgebung des Stalls berücksichtigt, sodass eine Umströmung des Stalls in der x - y -Ebene möglich ist. Außerdem sind die begrenzenden Seitenwände stromab des Stalls als pressure-outlet definiert. Hier ist eine Durchströmung senkrecht zur Fläche möglich, sodass die Strömung ein weiteres Ausweichgebiet hat. In Abbildung 24 ist zu erkennen, wie vor dem Segment die Stromlinien vollständig in den Stall hineinzeigen. Beim Gesamtstall hingegen wird die seitliche Umströmung deutlich, die bereits stromauf des Stalls beginnt. Die Position des Segmentschnittes in der Abbildung entspricht hierbei der realen Position relativ zum Gesamtstall.

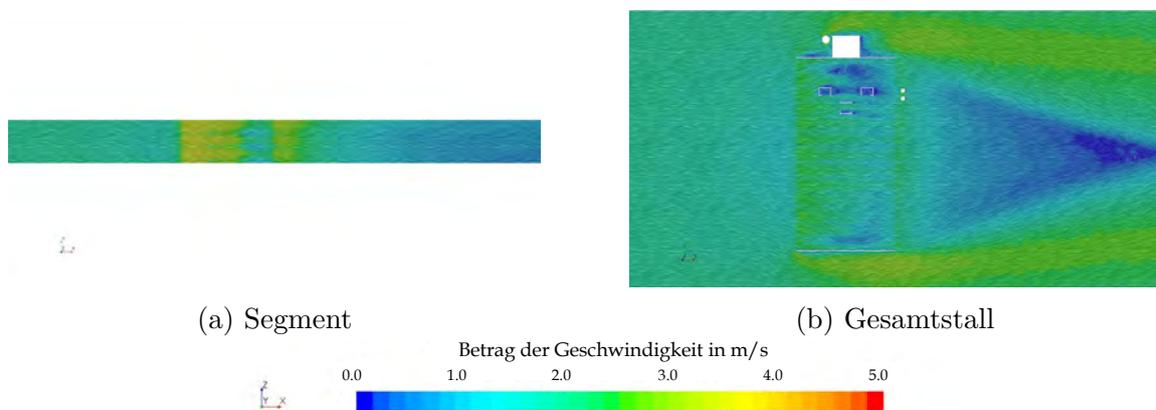


Abb. 24.: Darstellung des Schlierenbildes und der Geschwindigkeitsverteilung vom Segment und dem Gesamtstall bei einer Anströmung von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ ohne partielle Unterflurabsaugung auf einem Schnitt bei $z = 2 \text{ m}$

Bei der Betrachtung der Ammoniakverteilung im Stall ergibt sich zwischen dem Segment und dem Gesamtstall eine ähnliche Verteilung (siehe Abbildung 25).

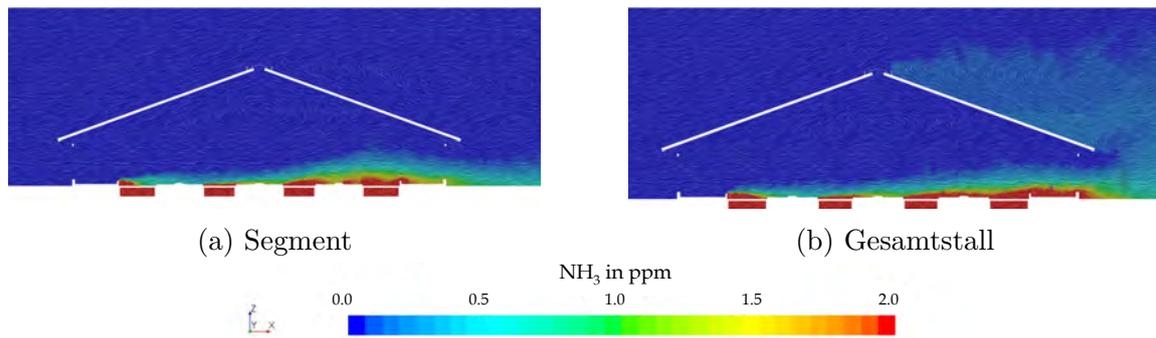


Abb. 25.: Darstellung des Schlierenbildes und der Ammoniakverteilung auf einem y -Schnitt im Segment und dem Gesamtstall bei einer Anströmung von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ ohne partielle Unterflurabsaugung

Hier sei allerdings angemerkt, dass die obige Darstellung nur für den betrachteten Schnitt gilt. Wird hingegen die windabgewandte Öffnung des Stalls dargestellt, zeigt sich, dass es starke Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Ammoniakkonzentration gibt (vgl. Abb. 26).

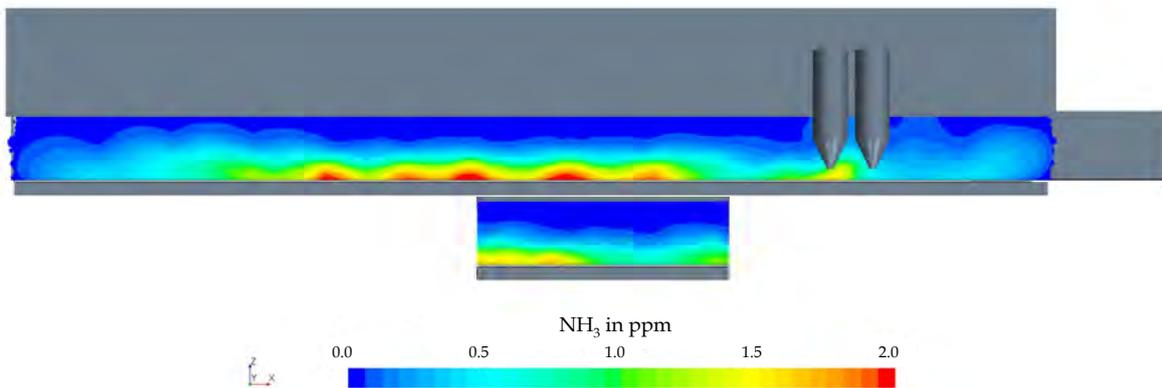


Abb. 26.: Darstellung der Ammoniakverteilung auf einem Schnitt in der Austrittsebene des Stalls beim Segment (unten) und dem Gesamtstall (oben) bei einer Anströmung von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ ohne partielle Unterflurabsaugung

An dieser Stelle wird deutlich, dass die beiden Simulationen nicht die gleichen Ergebnisse liefern. Neben dem oben genannten Unterschied der Randbedingungen in y -Richtung ist ein weiterer Punkt, dass das Segment mit Kühen gerechnet worden ist, die zusätzlich zur Stallgeometrie ein Hindernis für die Luft bilden. Sie wurden im Gesamtstall nicht mit berücksichtigt, da erwartet worden war, dass die Vernetzung die Anzahl der Elemente in der Rechenumgebung zu stark steigen lassen würde. Hinzu kommt, dass die Stallstruktur beim Segment im Oberflurbereich symmetrisch ist. Im Gesamtstall ist die Strukturverteilung im Oberflurbereich nicht symmetrisch, da die Liegeboxen nur etwas mehr als die Hälfte des Stalls einnehmen und die übrigen Aufbauten wie Melkroboter und Krankenstall ebenfalls zur Asymmetrie beitragen, sodass die Voraussetzungen für eine Vergleichbarkeit der beiden Simulationen auch in geometrischer Hinsicht nicht gegeben sind.

Um dennoch überprüfen zu können, ob eine Übertragung der Ergebnisse aus dem Segment auf den Gesamtstall möglich ist, wird die Emissionsminderung der partiellen Unterflurabsaugung betrachtet. Hierfür wurde für den Gesamtstall eine Simulation aufgebaut, bei der die Ventilatoren im Unterflurbereich mit 700 rpm rotieren. Dies entspricht einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 151.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Eine Darstellung der resultierenden Minderung der Ammoniakemissionen aufgrund der Zuschaltung der partiellen Unterflurabsaugung ist im Balkendiagramm in Abbildung 27 dargestellt.

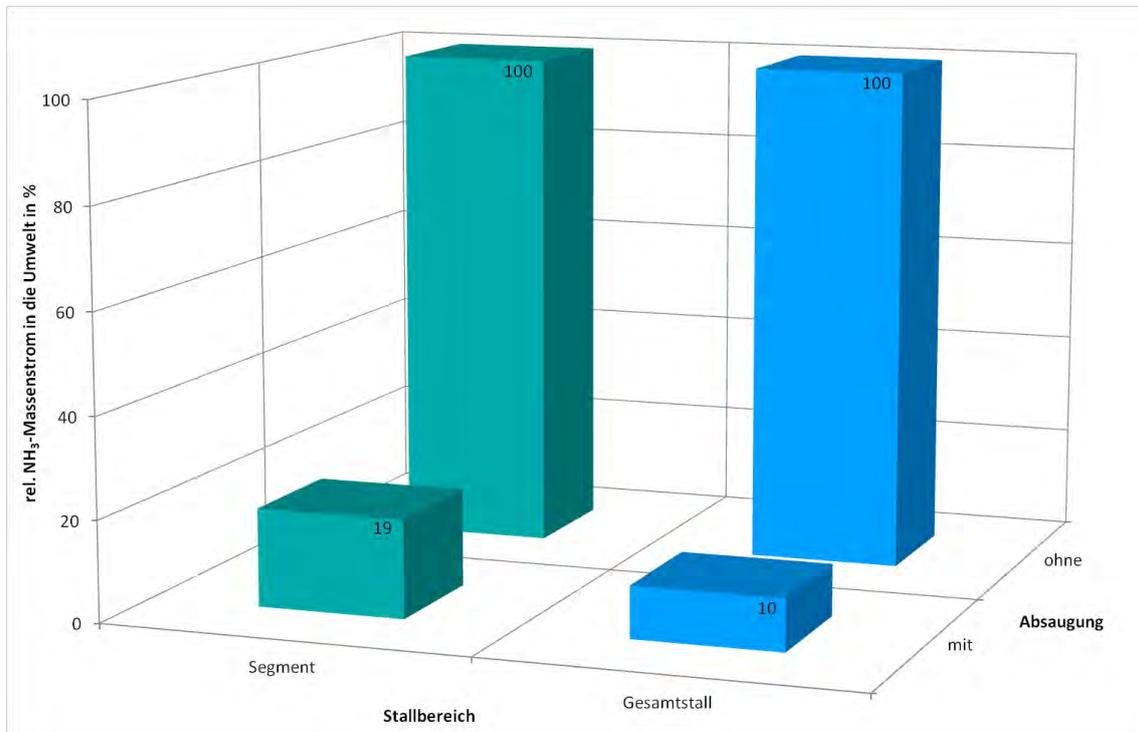


Abb. 27.: Balkendiagramm zum Vergleich der Minderung der Ammoniakemissionen durch die partielle Unterflurabsaugung zwischen einer Simulation des Segmentes und des Gesamtstalls bei einer Anströmung von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 151.000 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Kanal (entsprechend skaliert für das Segment)

Zur besseren Vergleichbarkeit wurde für beide Simulationen der Emissionswert ohne Unterflurabsaugung zu 100 % gesetzt. So lässt sich erkennen, dass die Absaugung in der Simulation des Gesamtstalls eine deutlich größere Minderung der Emissionen bewirkt. Dies ist konsistent zu den oben durchgeführten Betrachtungen. Aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeit im Stallinneren beim Segment kann hier die Unterflurabsaugung bei gleicher Leistung nur einen geringeren Unterdruck zwischen Ober- und Unterflurbereich erzeugen (vgl. auch Abb. 22).

Es ist daher davon auszugehen, dass die Ergebnisse, die am Segment erzielt wurden, eher eine konservativere Bewertung der partiellen Unterflurabsaugung zeigen. Eine abschließende Bewertung und Validierung am Gesamtstall ist allerdings nur durch einen Vergleich der Simulationen mit realen Messergebnissen möglich. Die hier durchgeführte Betrachtung stellt den Unterschied der Ergebnisse aufgrund der Modellierung dar und soll für die Einordnung sensibilisieren. Nichts desto trotz ist davon auszugehen, dass die realen Verhältnisse im Bereich zwischen dem Segment und dem Gesamtstall liegen.

Schräganströmung

Die Untersuchung der Schräganströmung ist von besonderem Interesse. Die bislang dargestellten Ergebnisse haben immer nur den Sonderfall einer Anströmung senkrecht zum First beinhaltet. Bei der Auslegung und Positionierung eines frei belüfteten Rinderstalls ist dies zwar die Hauptwindrichtung, die eine gute Durchlüftung des Stallinneren gewährleisten soll, aber es kann nicht davon ausgegangen werden, dass diese Windrichtung immer vorherrscht. Daher spielt es eine zentrale Rolle herauszufinden, ob die partielle Unterflurabsaugung auch bei einer anderen als der normalen Anströmung eine Verminderung der Emissionen des Stalls und eine Verbesserung der Luftqualität innerhalb des Stalls bewirken kann.

Die Untersuchung zur Schräganströmung wurde aufgrund der erforderlichen Randbedingungen in y -Richtung am Gesamtstall durchgeführt. Bei allen Simulationen betrug der Absaugvolumenstrom $104.000 \text{ m}^3/h$. Es fand hierbei eine Betrachtung von sechs verschiedenen Anströmwinkeln α statt. In Abbildung 28 sind die einzelnen Winkel sowie die Konvention zur Definition zu erkennen.

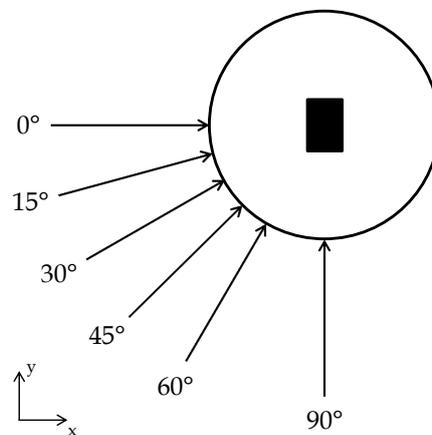


Abb. 28.: Definition der untersuchten Anströmwinkel am Gesamtstall

Die Anströmgeschwindigkeit bei den Winkelvariationen wurde konstant bei $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ gehalten. In Abbildung 29 sind für jeden Winkel der Betrag der Geschwindigkeit und die Strömungslinien in der x - y -Ebene in einer Höhe von $0,5 \text{ m}$ zur Verdeutlichung der Veränderung der Strömung mit fortschreitender Abweichung zur Normalströmung 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 $\alpha = 0^\circ$ (senkrecht zum First) 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 α größer wird, allerdings bei $\alpha = 60^\circ$ bereits zu zerfallen beginnt. Bei $\alpha = 90^\circ$ (Anströmung parallel zum First) bilden sich aufgrund des Strömungsabrisses an der windzugewandten Giebelwand zwei Wirbelgebiete an den langen Stallseiten.

Je größer der Anströmwinkel wird, desto weiter wandert auch die Ammoniakwolke des Stalls in dieser Richtung mit. Ein weiterer Effekt ist die stetige Verlangsamung der Durchströmung des Stalls mit Änderung des Anströmwinkels. Je mehr die Luft aus der Richtung des Anströmwinkels von $\alpha = 90^\circ$ kommt und damit auf die geschlossene Giebelwand trifft, desto weniger Luftaustausch findet im Stall statt. Dies wird zum einen an den Schlieren,

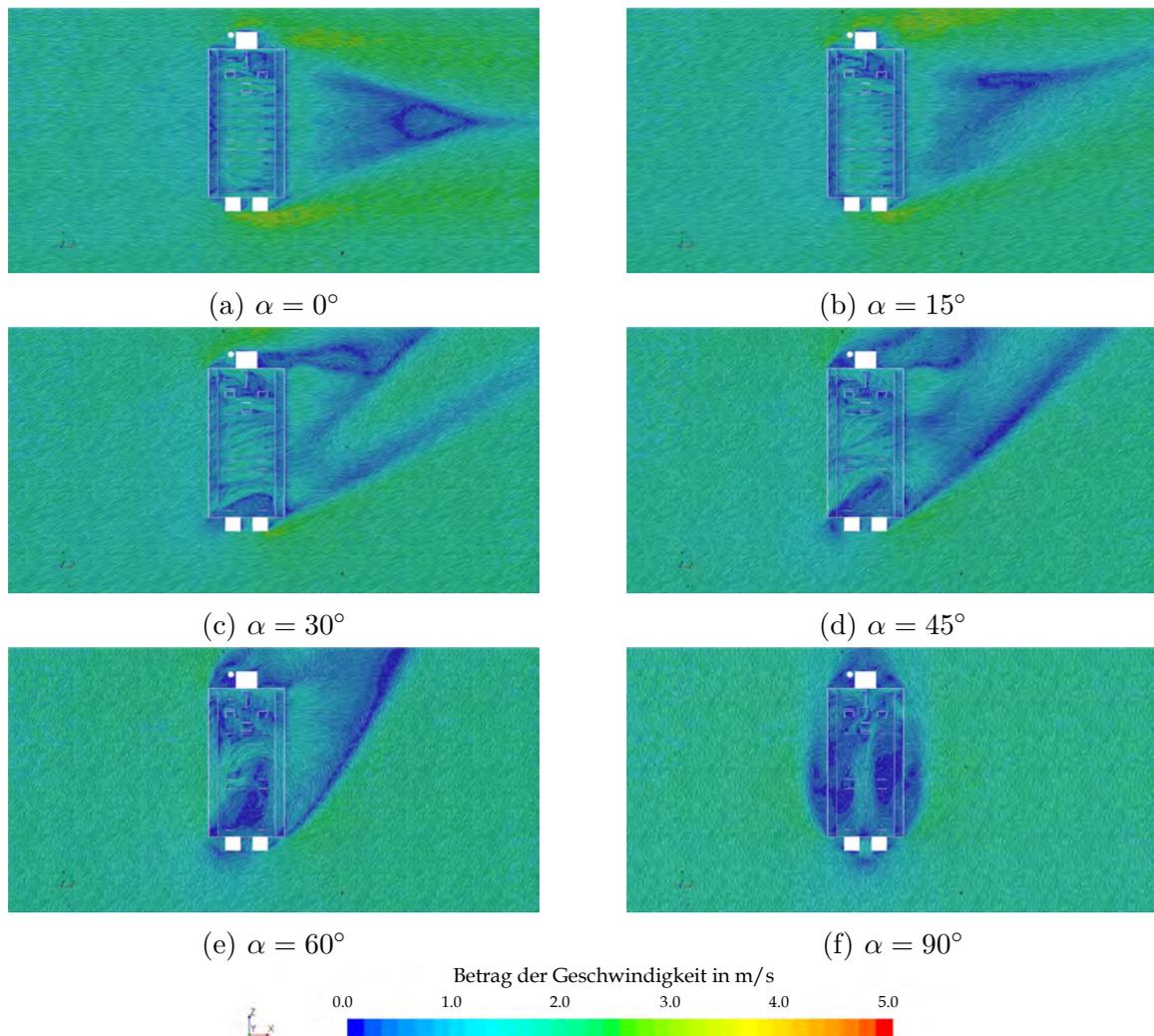


Abb. 29.: Vergleich des Betrages der Geschwindigkeit auf einem Schnitt bei $z = 0,5 \text{ m}$ bei variierendem Anströmwinkel am Gesamtstall bei einer Anströmung von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ und einem Absaugvolumenstrom von $104.000 \text{ m}^3/\text{h}$

die am Stall vorbei gehen, und zum anderen an den größeren blau eingefärbten Bereichen deutlich, die aufzeigen, dass hier die Luft fast still steht.

Die durchgeführten Simulationen stellen einen theoretischen, dauerhaften Zustand (steady state) dar. Sie zeigen jedoch den starken Wechsel der Durchströmungscharakteristik des frei belüfteten Rinderstalls in Abhängigkeit des Anströmwinkels. Daraus wird deutlich, welche Bedeutung die Positionierung eines neuen Stalls bereits in der Planungsphase hat. Eine falsche Orientierung zum Wind kann für die Tiere und die Emissionen starke negative Auswirkungen haben.

Wird die Ammoniakverteilung bei den entsprechenden Anströmwinkeln betrachtet (vgl. Abb. 30), so zeigt sich eine klare Korrelation zwischen der Wirbelbildung und einer lokalen Steigerung der Schadgaskonzentration.

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

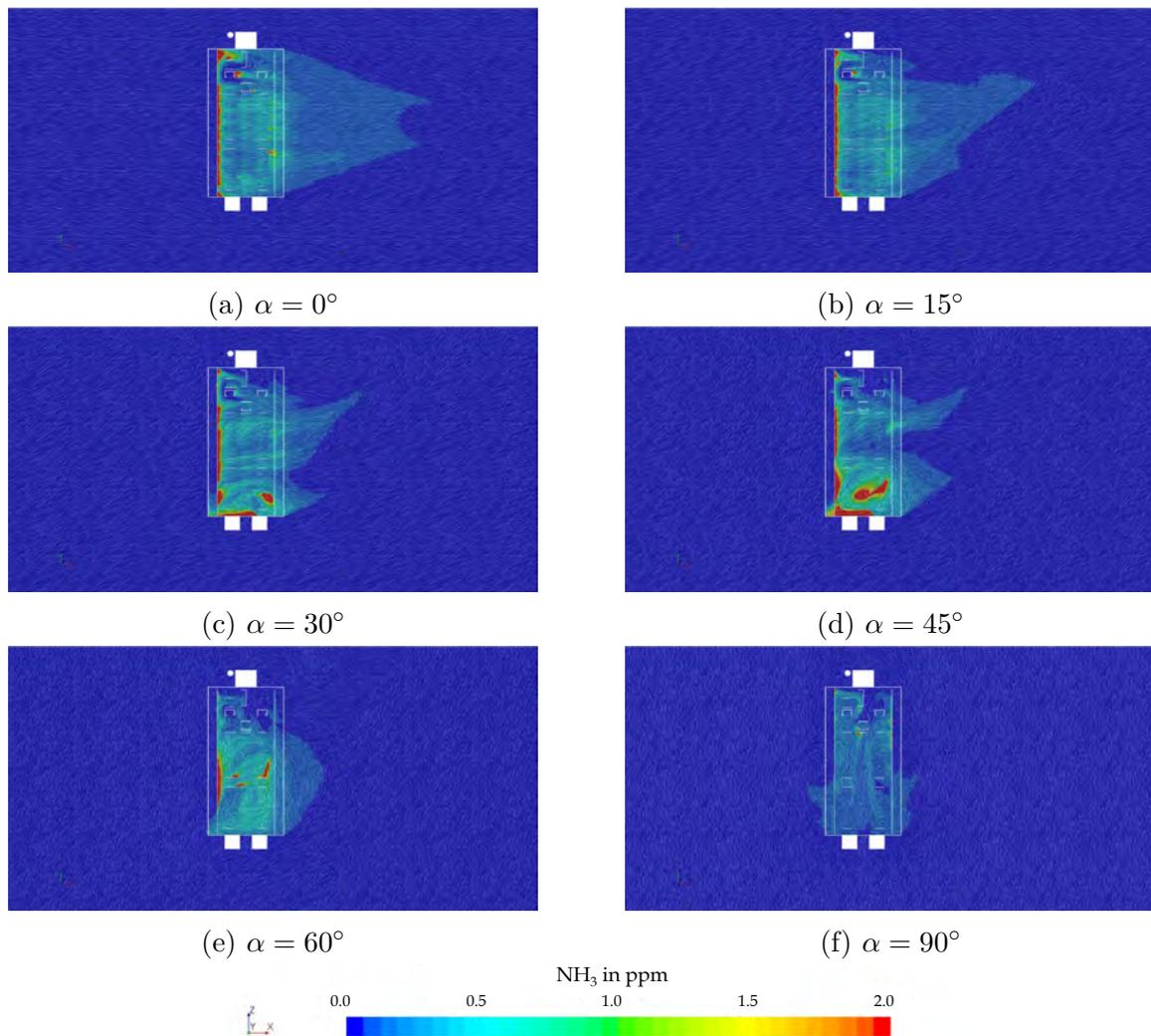


Abb. 30.: Vergleich der Ammoniakverteilung auf einem Schnitt bei $z = 0,5 \text{ m}$ bei variierendem Anströmwinkel am Gesamtstall bei einer Anströmung von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ und einem Absaugvolumenstrom von $104.000 \text{ m}^3/\text{h}$

Maximum bei $\alpha = 45^\circ$. Aufgrund der Wirbelstruktur entsteht hier ein Gebiet stärkeren Unterdruckes, sodass die Unterflurabsaugung bei gleicher Leistung hier lokal weniger Gegendruck aufbauen kann.

Dies zeigt sich auch bei der Auswertung der Ammoniakmassenströme, die den Stall verlassen (vgl. Abb. 31). Sie korrelieren mit den beobachteten Konzentrationen.

Bei den sehr kleinen Strömungsgeschwindigkeiten bei einem Anströmwinkel von $\alpha = 90^\circ$ innerhalb des Stalls kann die partielle Unterflurabsaugung bereits bei der hier betriebenen niedrigen Stufe fast das gesamte Ammoniak im Unterflurbereich halten. Dies ist zwar aus Sicht der Emissionsminderung sehr wünschenswert. Allerdings leidet darunter, wie bereits oben erwähnt, die Durchströmung des Stalls. Auf den Zielkonflikt zwischen langsamer Durchströmung des Stalls und der dadurch gesteigerten Leistungsfähigkeit der partiellen Unterflurabsaugung wird im Abschnitt zu den Windschutznetzen noch einmal genauer eingegangen.

Durch den großen Wirbel bei $\alpha = 45^\circ$ und die dadurch erzeugte Sogwirkung im Bereich der windzugewandten Seite stößt die Absaugung in der in dieser Simulation betrachteten Einstellung von $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/\text{h}$ allerdings an ihre Grenzen (vgl. Abb. 32b). Aus die-

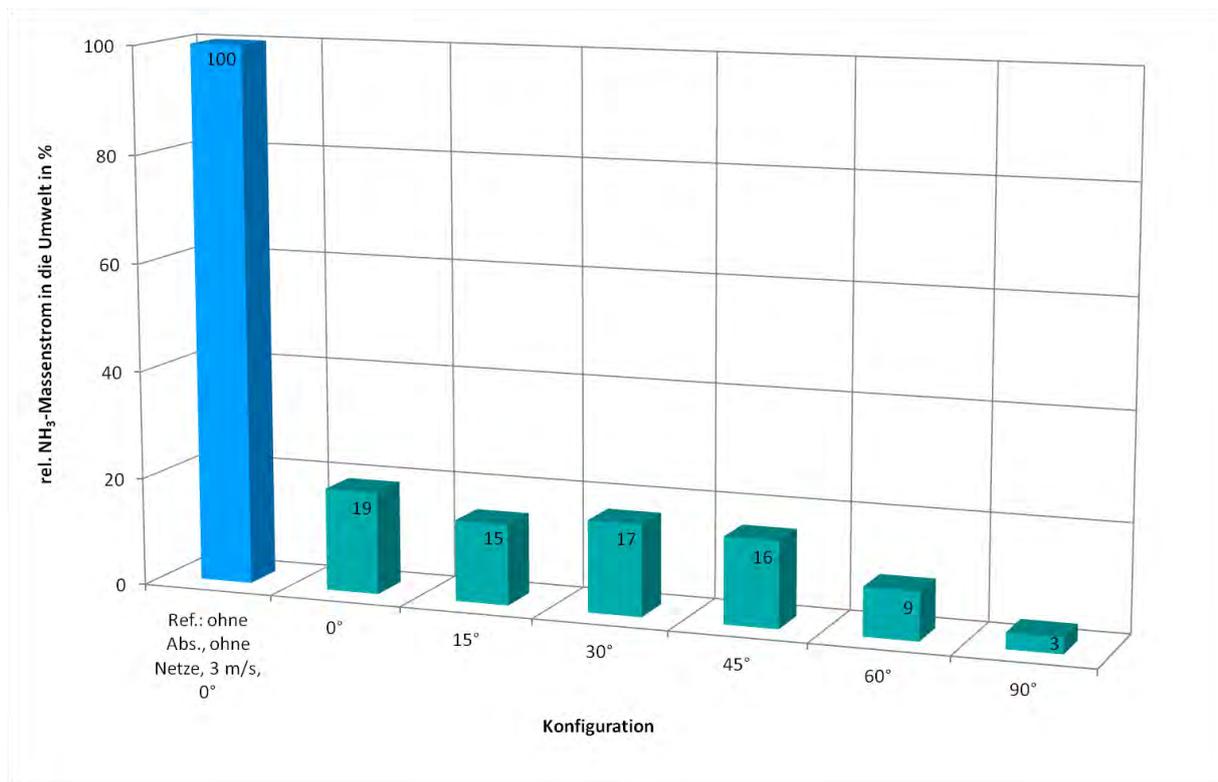


Abb. 31.: Balkendiagramm zum Vergleich des Ammoniakmassenstroms in die Umwelt aus dem Gesamtstall für die verschiedenen Anströmwinkel α bei einer Anströmgeschwindigkeit von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/\text{h}$; Referenz: Gesamtstall ohne Absaugung, ohne Windschutznetze, $v_{10} = 3 \text{ m/s}$, $\alpha = 0^\circ$

sem Grund wurden zwei weitere Simulationen durchgeführt, bei denen die Drehzahlen der sechs Ventilatoren pro Absaugkanal direkt unterhalb des Wirbelbereiches hochgefahren wurden. Die daraus resultierenden Volumenströme sind dann $\dot{V} = 109.000 \text{ m}^3/\text{h}$ beziehungsweise $\dot{V} = 121.000 \text{ m}^3/\text{h}$ (vgl. Abb. 32c und 32d). Hier wurde zusätzlich als Vergleich eine Simulation dargestellt, bei der für einen Anströmwinkel von ebenfalls $\alpha = 45^\circ$ keine partielle Unterflurabsaugung installiert ist (vgl. Abb. 32a). Hierdurch nimmt der Bereich mit stark erhöhter Ammoniakkonzentration fast die gesamte windzugewandte Stallhälfte ein. Dies hat nicht nur eine extreme Verschlechterung der Luftqualität im Stallinneren, sondern auch eine starke Erhöhung der Ammoniakemissionen in die Umwelt zur Folge. Durch eine gezielte Anpassung der Absaugung, wie bereits oben geschrieben, kann dieser Bereich signifikant verkleinert werden, sodass sowohl die Tiere als auch die Umwelt davon profitieren.

Die Auswertung im Balkendiagramm verdeutlicht die Möglichkeiten der partiellen Unterflurabsaugung bei von der Hauptwindrichtung abweichenden Strömungszuständen durch punktuelle Regelung der Ventilatoren im Unterflurbereich (vgl. Abb. 33).

In der Praxis muss getestet werden, wie genau die Regelung hierzu funktionieren kann. Eine zu hohe Abtastrate würde gerade bei böigen Situationen für ein ständiges Anpassen der Regelklappen führen. Dies kann unter anderem zu einem stärkeren Verschleiß der mechanischen Teile führen. Eine zu geringe Abtastrate würde auch bei länger anhaltenden Zuständen die Klappen nicht richtig anpassen, sodass hier Potential verschenkt werden würde. Es gilt daher, einen guten Kompromiss zwischen der zeitlichen Anpassung und der Trägheit des Systems zu finden.

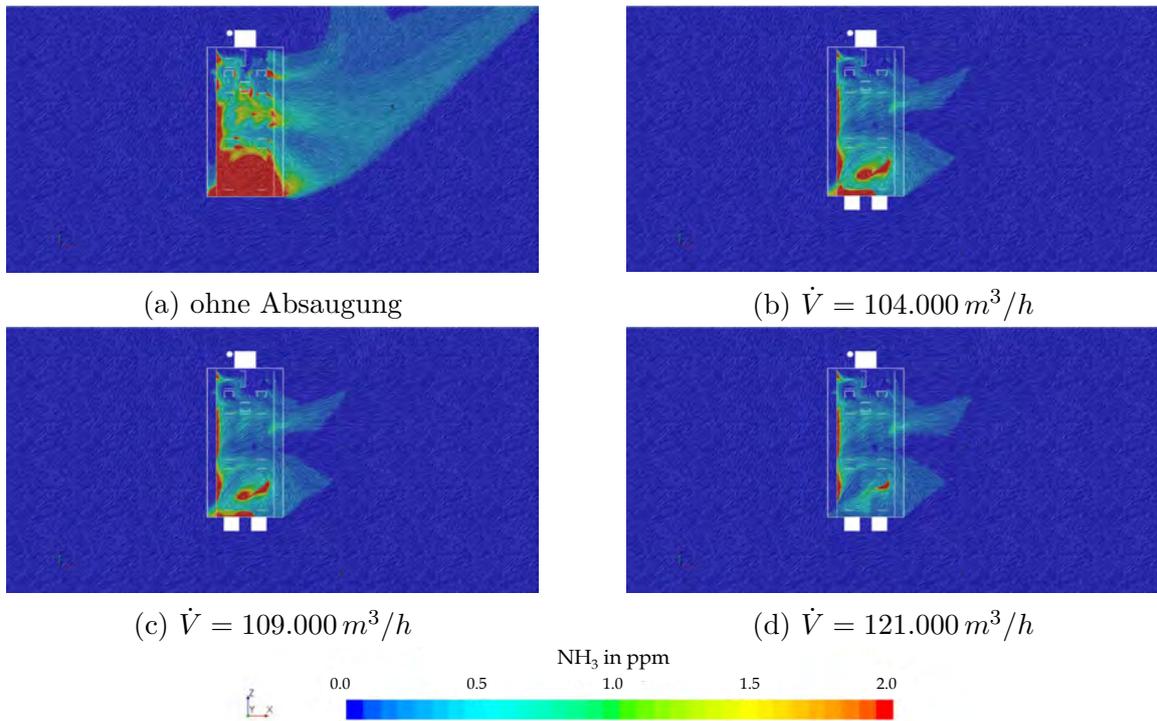


Abb. 32.: Vergleich der Ammoniakverteilung auf einem Schnitt bei $z = 0,5 \text{ m}$ bei einem Anströmwinkel von $\alpha = 45^\circ$ am Gesamtstall bei einer Anströmung von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ und variierenden Absaugvolumenstrom

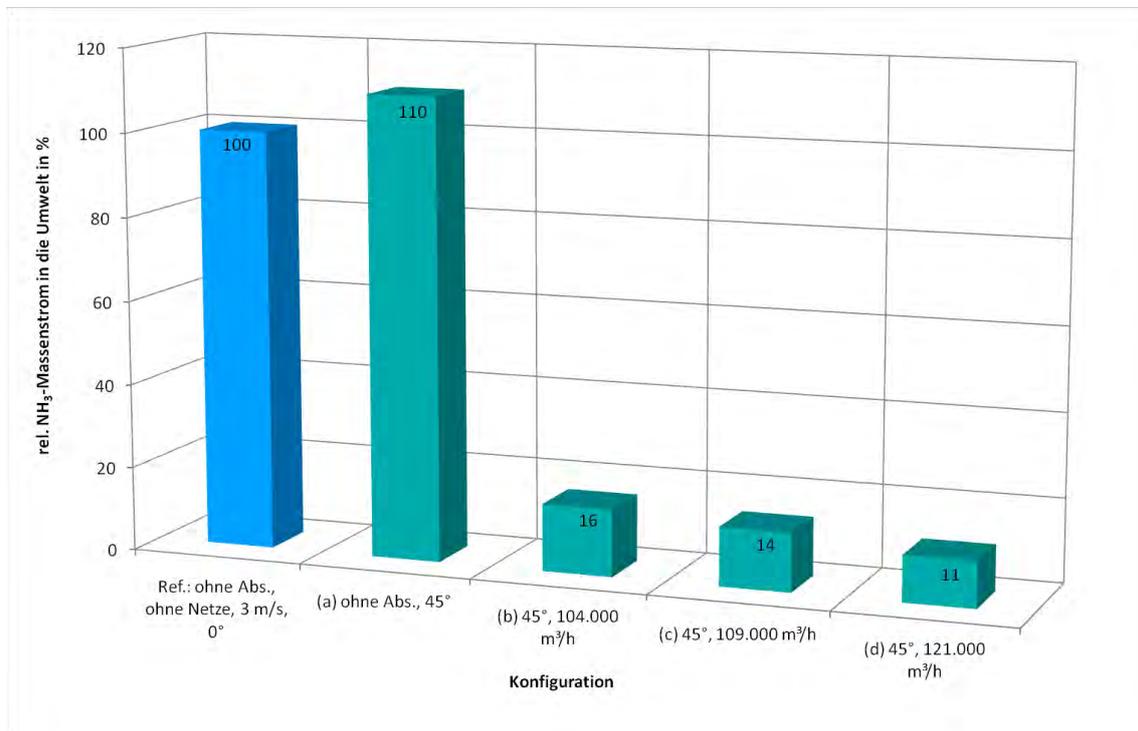


Abb. 33.: Balkendiagramm zum Vergleich des Ammoniakmassenstroms in die Umwelt aus dem Gesamtstall für einen Anströmwinkel von $\alpha = 45^\circ$ bei einer Anströmgeschwindigkeit von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ und variierendem Absaugvolumenstrom; Referenz: Gesamtstall ohne Absaugung, ohne Windschutznetze, $v_{10} = 3 \text{ m/s}$, $\alpha = 0^\circ$

Die Ergebnisse aus der Numerik für die Schräganströmung stimmen gut mit Windkanalversuchen von Choinière und Munroe (1994) überein. Hier wurde an einem 1:20 Modell von einem Schweinestall der Einfluss des Anströmwinkels auf die Durchströmungscharakteristik im Stallinneren untersucht. Die Untersuchungen fanden bei einer Anströmgeschwindigkeit von $\bar{v} = 1,1 \text{ m/s}$ statt. Dies entspricht einer Reynoldszahl von $Re = 7.442$ bei Verwendung der Seitenwandhöhe als Referenzlänge. Diese Reynoldszahl entspricht einer Anströmgeschwindigkeit von $\bar{v} \approx 0,03 \text{ m/s}$ im numerischen Modell des hier betrachteten Rinderstalls, was in einer Anströmgeschwindigkeit von $v_{10} \approx 0,48 \text{ m/s}$ resultieren würde. Ab einer Reynoldszahl von $Re = 5.400$ (bei Verwendung der Seitenwandhöhe als Referenzlänge) wird von einer voll entwickelten turbulenten Strömung ausgegangen, bei der sich bei gleicher Geometrie und isothermen Bedingungen die Charakteristik der Durchströmung nicht ändert (Choinière und Munroe (1994), Choinière et al. (1988)). Die hier durchgeführten Simulationen haben eine Reynoldszahl von $Re \approx 51.000$ bei einer Anströmung von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ ($\bar{v} \approx 0,19 \text{ m/s}$) und wurden isotherm simuliert, sodass die Durchströmungscharakteristik unabhängig von der Anströmgeschwindigkeit ist, wodurch die Ergebnisse von Choinière und Munroe (1994) als Validierung erster Näherung herangezogen werden können, auch wenn in den Windkanalversuchen die Seitenwände nur halb von oben geöffnet waren.

Windschutznetze

Zur Steuerung des Volumenstroms und der Luftaustauschrate werden in der Regel automatisch oder manuell gesteuerte Windschutznetze, Jalousien oder eine Kombination verwendet. Bei hohen Windgeschwindigkeiten wird der Querschnitt der Seitenwand reduziert, um die Zugluft im Stall vor allem im Winter zu minimieren (Etlinger (2017), Caduff (2020)).

Um dieses Verhalten abbilden zu können, wurden für drei Positionen der Windschutznetze Simulationen bei einer Anströmgeschwindigkeit von $v_{10} = 10 \text{ m/s}$ mit einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/\text{h}$ durchgeführt. Betrachtet wurden eine vollständige Schließung der Seitenwand sowie jeweils halb geschlossene Windschutznetze einmal von oben und einmal von unten. Die Lufttemperatur wurde hier nicht berücksichtigt, sodass erneut isotherme Bedingungen herrschten. Ferner wurden für die windzu- und windabgewandte Seite je Simulation die gleichen Konfigurationen verwendet. Folglich wurden drei Situationen dargestellt (vgl. Abb. 34):

- ganz: beide Seiten ganz geschlossen
- oben: beide Seiten von oben geschlossen
- unten: beide Seiten von unten geschlossen

Die Modellierung der Windschutznetze erfolgte über ein Porous-Baffle-Interface. Die Porosität des interfaces wird über verschiedene Parameter vorgegeben und die Geschwindigkeit hinter dem Interface über einen Drucksprung angepasst (STAR-CCM+ (2018a)).

Die Parameter wurden in der Simulation derart eingestellt, dass eine Bremsung auf etwa 50 % der vor dem interface herrschenden Windgeschwindigkeit erfolgte.

Abbildung 35 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung und das Schlierenbild für die drei Konfigurationen.

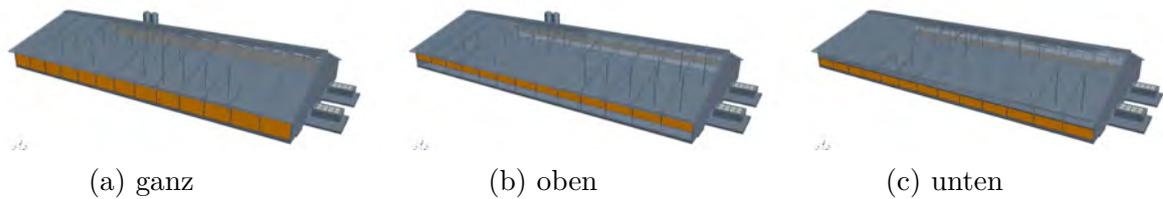


Abb. 34.: Darstellung der drei Konfigurationen der Windschutznetze: ganz, oben und unten

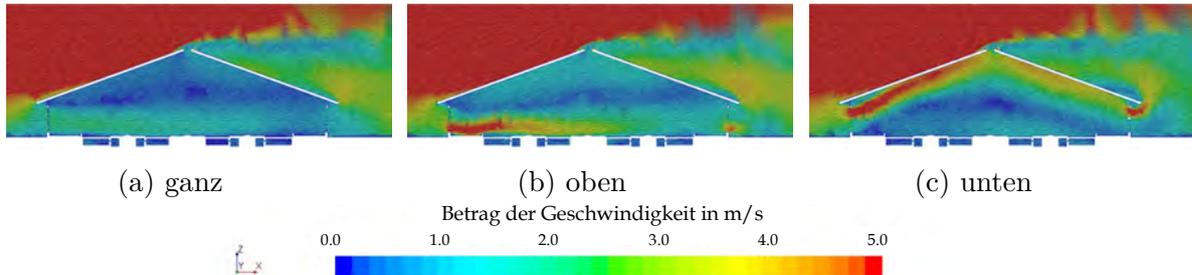


Abb. 35.: Darstellung des Schlierenbildes und der Geschwindigkeitsverteilung im Mittelschnitt des Gesamtstalls für die drei Konfigurationen der Windschutznetze bei einer Anströmung von $v_{10} = 10 \text{ m/s}$ und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/\text{h}$

Es ist zu erkennen, dass bei vollständig geschlossenen Netzen die Luft über der gesamten Höhe der Seitenwandöffnung abgebremst wird. Das Strömungsverhalten ähnelt dem mit offenen Seitenwänden und einer Anströmung von $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ (vgl. Abb. 23b). Trotz der hohen Anströmungsgeschwindigkeit fließt die Luft langsam durch den Stall. Im oberen Stallbereich bildet sich ein gegen den Uhrzeigersinn drehender Wirbel.

Werden die Windschutznetze hingegen nur von oben geschlossen, strömt die Luft durch die verbleibende Öffnung mit hohem Impuls in den Stall hinein und bildet eine Schicht starker Zugluft im unteren Stallbereich. Hierdurch ist die Luftgeschwindigkeit über den Spalten sehr hoch. Insgesamt ist die Strömung im gesamten Stall deutlich schneller als bei ganz geschlossenen Windschutznetzen. Auch hier entsteht ein gegen den Uhrzeigersinn drehender Wirbel im oberen Stallbereich.

Werden die Windschutznetze von unten geschlossen, bildet sich eine vollständig andere Strömungssituation als bei den beiden Fällen zuvor. Die Luft strömt auch hier mit hohem Impuls durch die Öffnung der Seitenwand, legt sich allerdings an die Decke an und induziert so einen Wirbel im unteren Stallbereich, der sich im Uhrzeigersinn dreht. Die impulsreiche Luft bildet eine Art Jetstream, der sich an der Decke des Stalls befindet.

Beim Blick auf die Ammoniakverteilung in Abbildung 36 zeigt sich die starke Korrelation dieser zur Durchströmung des Stalls und der Luftgeschwindigkeit über den Spaltenböden. Je höher insbesondere letztere ist, desto mehr arbeitet die Oberflurströmung gegen die Absaugung und desto höher sind auch die Ammoniakkonzentrationen im Stallinneren und damit auch die Ammoniakemissionen aus dem Stall heraus.

Durch die langsame Strömung bei ganz geschlossenen Windschutznetzen kann hier die Unterflurabsaugung die Konzentrationen im Oberflurbereich gering halten. Außerdem wirkt der vergleichsweise geringe Volumenstrom ebenfalls emissionsmindernd. Dies verdeutlicht sich vor allem beim Blick auf die Ammoniakkonzentration bei der Konfiguration „oben“. Durch die sehr hohe Strömungsgeschwindigkeit über den Spalten wird hier die kontami-

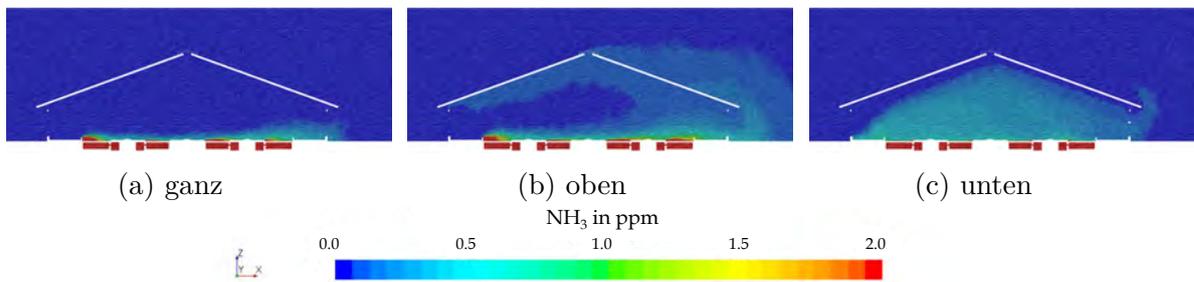


Abb. 36.: Darstellung des Schlierenbildes und der Ammoniakverteilung im Mittelschnitt des Gesamtstalls für die drei Konfigurationen der Windschutznetze bei einer Anströmung von $v_{10} = 10 \text{ m/s}$ und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/\text{h}$

nierte Luft aus dem Unterflurbereich nach oben gesaugt. Der sehr hohe Volumenstrom bewirkt hier eine zusätzliche Steigerung der Emissionen. In der Konfiguration „unten“ arbeitet vor allem der sehr starke Wirbel aufgrund des impulsreichen Jetstreams gegen die Absaugung und verteilt das Schadgas im gesamten Innenraum. Der hohe Volumenstrom trägt dieses dann in die Umwelt.

Die beobachteten Zusammenhänge spiegeln sich in den ausgewerteten Ammoniakmassenströmen in die Umwelt wieder (vgl. Abbildung 37). Hier wurde der Ammoniakmassenstrom an den Schnittstellen First und hintere, windabgewandte Stallseite ausgewertet und aufsummiert.

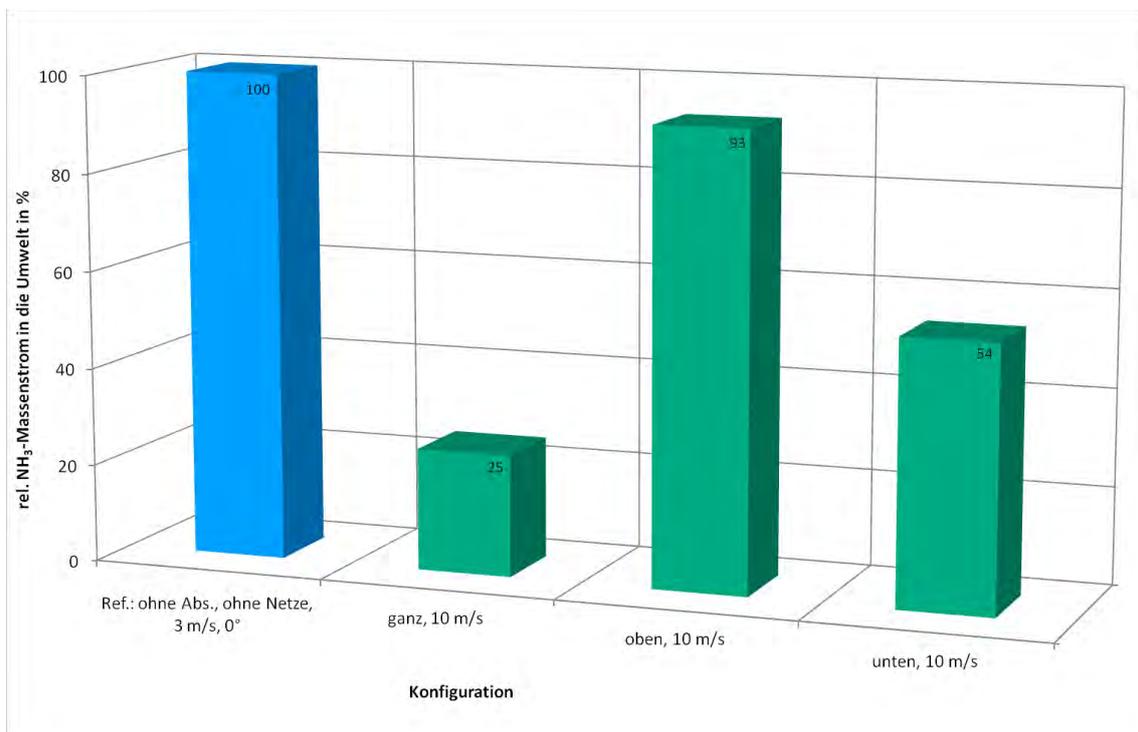


Abb. 37.: Balkendiagramm zum Vergleich des Ammoniakmassenstroms in die Umwelt aus dem Gesamtstall für die drei Konfigurationen der Windschutznetze bei einer Anströmung von $v_{10} = 10 \text{ m/s}$ und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/\text{h}$; Referenz: Gesamtstall ohne Absaugung, ohne Windschutznetze, $v_{10} = 3 \text{ m/s}$, $\alpha = 0^\circ$

Die hier gemachten numerischen Untersuchungen stimmen qualitativ gut mit den Windkanaluntersuchungen von Qianying et al. (2018) und Morsing et al. (2002) überein. Für die von oben und unten geschlossenen Konfigurationen bilden sich ähnliche Durchströmungscharakteristiken im Stall. Die signifikante Änderung der Strömungsbedingungen im Stall in Abhängigkeit der Position der Seitenwand wurde ebenfalls im Windkanal beobachtet. Um die Praxisnähe der Windschutznetzkonfigurationen abschätzen zu können, wurde die Arbeitsgruppe in Braunschweig am 21.10.2019 von Herrn Heitmüller der Firma HUESKER Synthetic GmbH (HUESKER Synthetic GmbH (2020)) besucht. Er ist der Geschäftsfeldmanager Licht und Luft und Experte im Bereich der Steuerung und des Einsatzes von Windschutznetzen und Jalousien in frei belüfteten Rinderställen, Reithallen und ähnlichen Gebäuden.

Grundlage des Gesprächs war die Präsentation der oben vorgestellten Ergebnisse sowie eine erwünschte Einordnung in deren Praxisnähe. Herr Heitmüller stellte anschaulich und mit vielen Praxisbeispielen die in den heutigen Tagen favorisierte Steuerung und Nutzung von Windschutznetzen vor. Es zeigte sich, dass eine Kombination von Jalousien, die den Wind zu 100 % abblocken, und Windschutznetzen mit verschiedenen Porositäten zum Einsatz kommen. Auf dieser Grundlage wurde unser Modell erweitert und für drei verschiedene Situationen berechnet, die für die Absaugung optimiert worden sind.

Herr Heitmüller erklärte, dass bei geringen Windgeschwindigkeiten ($v_{10} = 3 \text{ m/s}$) keine Jalousien zum Einsatz kommen. In Kombination mit den bereits zuvor erzielten Berechnungsergebnissen wurde daher 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 (hier wurden die gleichen Einstellungen wie bei den oben beschriebenen Simulationen verwendet). Bei mittleren Windgeschwindigkeiten ($v_{10} = 5 \text{ m/s}$) wird dann 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 38.

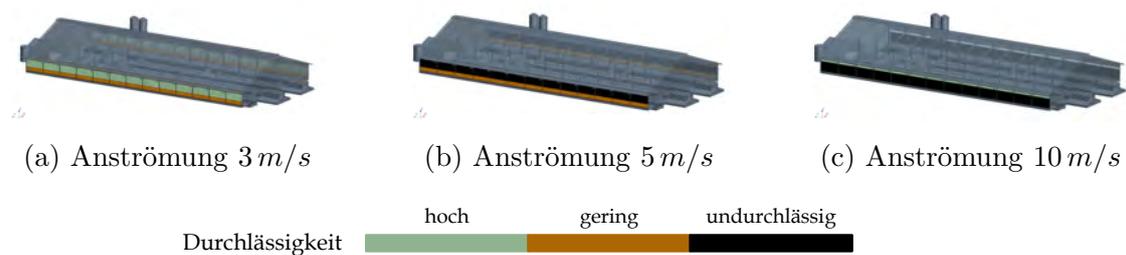


Abb. 38.: Konfiguration der Windschutznetze und Jalousien für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten

Für die Vergleichbarkeit wurden alle drei Simulationen mit dem gleichen konstanten Absaugvolumenstrom von $104.000 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Kanal wie die vorherigen Konfigurationen gerechnet. In den Abbildungen 39 und 40 sind die Geschwindigkeits- und Ammoniakverteilungen für die jeweiligen Anströmungen und Konfigurationen dargestellt.

In der Geschwindigkeitsverteilung (Abb. 39) lässt sich feststellen, dass bei allen drei Konfigurationen in etwa die gleiche Luftgeschwindigkeit im Stallinneren herrscht. Dies macht es der konstant arbeitenden Absaugung leichter, einen negativen Druckgradienten zwi-

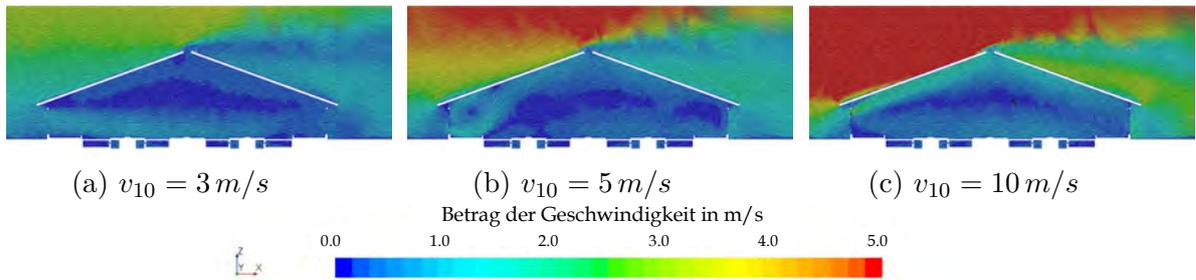


Abb. 39.: Darstellung des Schlierenbildes und der Geschwindigkeitsverteilung im Mittelschnitt des Gesamtstalls für die drei optimierten Kombinationen der Windschutznetze und Jalousien bei einer variierenden Anströmung und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/\text{h}$

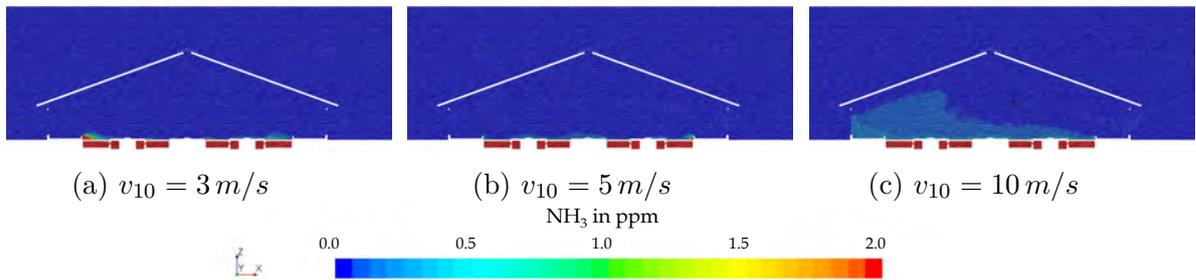


Abb. 40.: Darstellung des Schlierenbildes und der Ammoniakverteilung im Mittelschnitt des Gesamtstalls für die drei optimierten Kombinationen der Windschutznetze und Jalousien bei einer variierenden Anströmung und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/\text{h}$

schen dem Ober- und Unterflurbereich aufrecht zu erhalten, welches beim Blick auf die Ammoniakverteilung in Abbildung 40 deutlich wird. Es bildet sich nur eine sehr geringe Konzentration im Aufenthaltsbereich oberhalb des Spaltenbodens, sodass die Emissionen ebenfalls sehr gering sind. Im Balkendiagramm in Abbildung 41 sind die resultierenden Ammoniakmassenströme in die Umwelt dargestellt.

Diese Ergebnisse zeigen, dass durch ein Zusammenspiel von Windschutznetzen, Jalousien und partieller Unterflurabsaugung die Ammoniakemissionen eines frei belüfteten Rinderstalls signifikant bei unterschiedlichen Randbedingungen gesenkt werden können.

Dennoch ist es wichtig, die Ergebnisse nicht nur aus der Sicht der Absaugung zu beurteilen. Ein Parameter zur Bestimmung der Effektivität einer Stalllüftung ist die Luftwechselrate (engl.: air exchange rate, AER). Für frei belüftete Rinderställe sollte im Sommer eine AER von 60 bis 100 und im Winter von 4 pro Stunde nicht unterschritten werden (vgl. Etlinger (2017)). Dies bedeutet, dass beispielsweise im Winter der Zuluftvolumenstrom so sein sollte, dass pro Stunde mindestens das vierfache Volumen des Gebäudeinneren zugeführt wird.

Der hier betrachtete Stall hat ein Stallvolumen von etwa $V_{Stall} \approx 27.000 \text{ m}^3$. Dies bedeutet mit den oben genannten Zahlen, dass im Winter eine Zuluft von mindestens $\dot{V}_{Zuluft} = 108.000 \text{ m}^3/\text{h}$ und im Sommer von $\dot{V}_{Zuluft} = 1.620.000 \text{ m}^3/\text{h}$ bis $\dot{V}_{Zuluft} = 2.700.000 \text{ m}^3/\text{h}$ gewährleistet werden sollte. In Tabelle 5 sind für verschiedene in diesem Projekt durchgeführte Simulationen die in den Stall strömenden Luftvolumenströme aufgelistet und hinsichtlich der AER ausgewertet. Es zeigt sich eine breite Streuung der Lüfrate einmal in

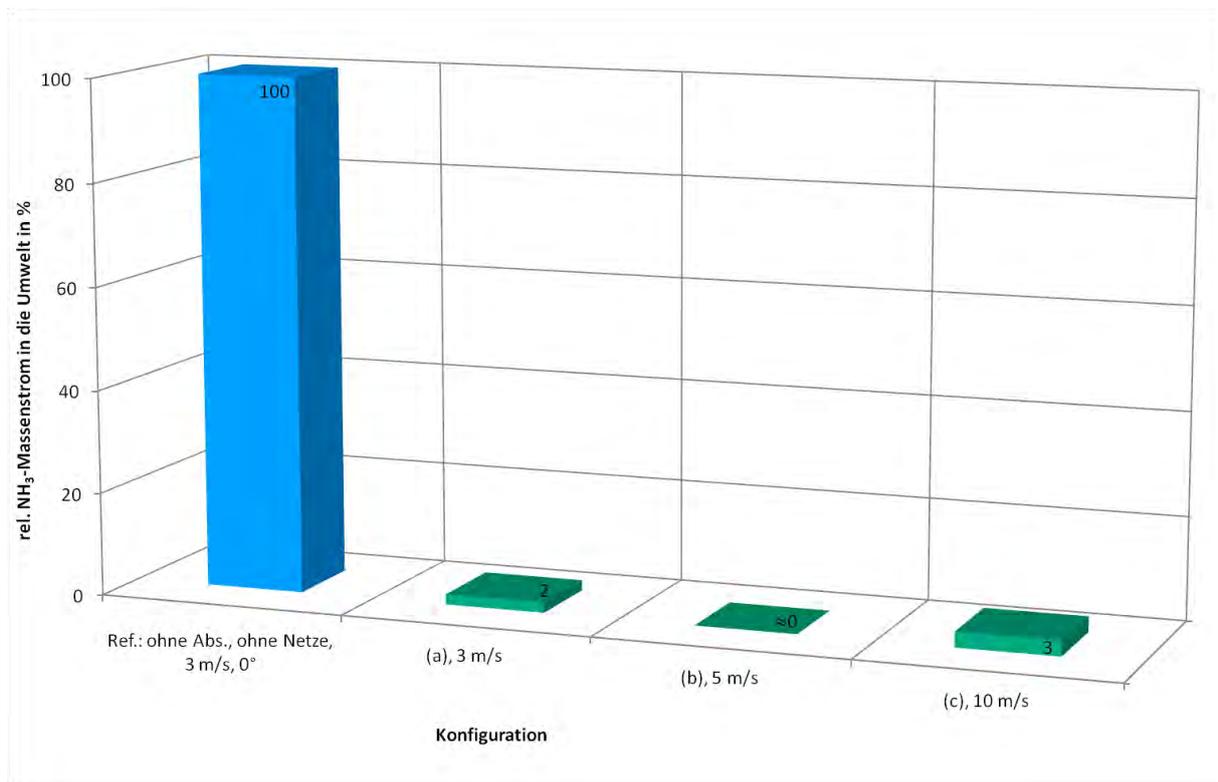


Abb. 41.: Balkendiagramm zum Vergleich des Ammoniakmassenstroms in die Umwelt aus dem Gesamtstall für die drei für die Absaugung optimierten Kombinationen der Windschutznetze und Jalousien bei einer variierenden Anströmung und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/\text{h}$; Referenz: Gesamtstall ohne Absaugung, ohne Windschutznetze, $v_{10} = 3 \text{ m/s}$, $\alpha = 0^\circ$

Simulation	\dot{V}_{Zuluft} in $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	AER in h^{-1}
offen, $v_{10} = 3 \text{ m/s}$	2.363.000	87
offen, $v_{10} = 10 \text{ m/s}^1$	10.330.000	382
Windschutznetze ganz, $v_{10} = 10 \text{ m/s}$	1.876.000	69
Windschutznetze opt., $v_{10} = 3 \text{ m/s}$	743.000	26
Windschutznetze opt., $v_{10} = 5 \text{ m/s}$	374.000	13
Windschutznetze opt., $v_{10} = 10 \text{ m/s}$	597.000	22

¹ Werte aus Simulation mit Segment auf Gesamtstall extrapoliert (siehe Abschnitt **Validierung des Gesamtstalls** in 5.5.2)

Tab. 5.: Auflistung verschiedener Zuluftvolumenströme in den Stall und den daraus resultierenden Luftwechselraten AER bei verschiedenen Randbedingungen

Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit, aber auch in Abhängigkeit der Windschutznetzkonfiguration. Besonders bei den Simulationen mit den verschiedenen Windschutznetzen ist zu erwähnen, dass sie für eine isotherme Situation, bei der sowohl die Wärme als auch die Luftfeuchtigkeit, die durch die Tiere entstehen, nicht berücksichtigt wurden, durchgeführt worden sind. Eine solche Simulation stellt folglich eine Sommersituation dar, in der gemäß den oben angeführten Vorgaben die Luftwechselraten nicht eingehalten werden. Dies verdeutlicht, dass mit den durchgeführten Berechnungen sicherlich noch nicht das Optimum aus Sicht der Tiere erreicht worden ist. Es besteht weiterhin Forschungsbedarf in dieser Fragestellung.

Zur weiteren Einordnung der Ergebnisse sei außerdem angemerkt, dass die hier durchgeführten Maßnahmen durch die Windbremsmechanismen eine Änderung des Offenstalls zu einem geschlossenen Stall hin andeuten. Dies steht im Widerspruch zur Forderung nach mehr Tierwohl, indem den Tieren der Zugang zu verschiedenen Klimazonen, vorzugsweise durch einen Außenklimastall, ermöglicht wird (Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim BMEL (2015)). Aus diesen Gründen wird hier darauf hingewiesen, dass die betrachteten Optimierungen vor allem vor dem Hintergrund der Minimierung der Ammoniakemissionen geschahen, um das Potential der partiellen Unterflurabsaugung zu verdeutlichen. In der oben dargestellten Tabelle wurden die Volumenströme an der windzugewandten Seite des Stalls ausgewertet. Durch den Einsatz der Windschutznetze ändert sich aber auch das Strömungsverhalten des Stallgebäudes insgesamt. Besonders bei hohen Windgeschwindigkeiten bildet sich aufgrund des Strömungswiderstandes des Gebäudes ein starkes Unterdruckfeld stromab der windabgewandten Seite, wodurch es in Kombination mit der dreidimensionalen Umströmung des Stalls zu Sekundärströmungen kommt. Hierdurch kann es passieren, dass auf der windabgewandten Seite nicht alle Stallöffnungen als Auslass fungieren, sondern dass auf der Leeseite auch Bereiche entstehen, in denen die Strömung entgegen der Windrichtung in den Stall einströmt. Beispielhaft sei dies für die für die Absaugung optimierte Windschutznetzkonfiguration bei einer Anströmung von $v_{10} = 10 \text{ m/s}$ gezeigt (vgl. Abbildung 42).

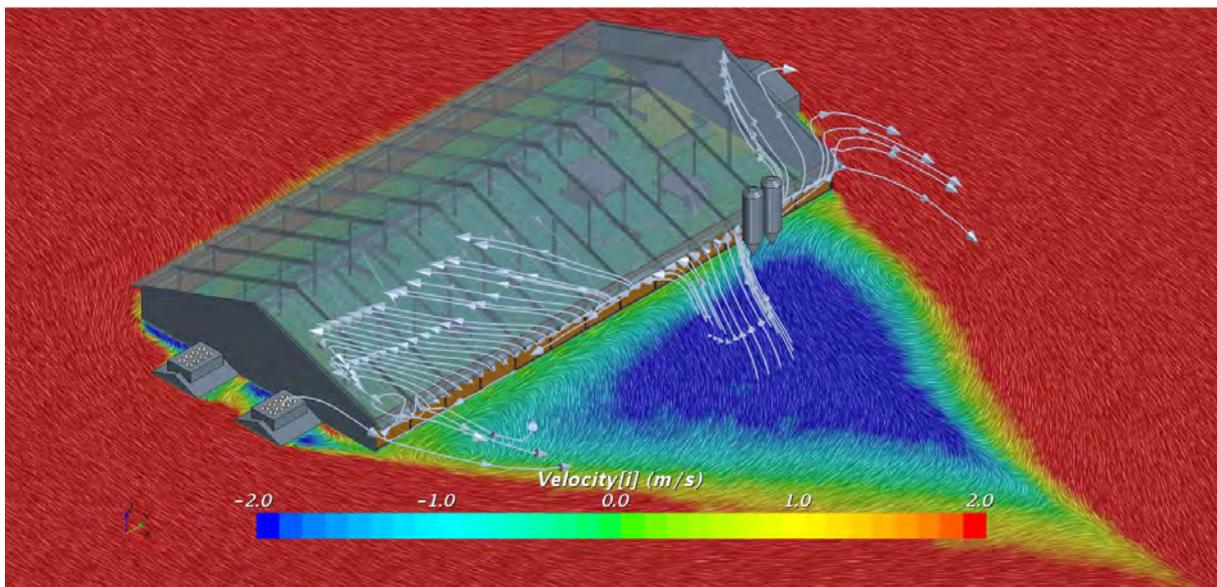


Abb. 42.: Darstellung der Stromlinien hinter der Seitenwandöffnung auf der windabgewandten Stallseite und der Geschwindigkeit in x-Richtung für die für die Absaugung optimierte Windschutznetzkonfiguration bei einer Anströmung von $v_{10} = 10 \text{ m/s}$ und einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/\text{h}$

Es ist zu erkennen, dass es etwa ab der Stallmitte einen Bereich gibt, in dem die Luft entgegen der vorherrschenden Windrichtung in den Stall einströmt. Hinter den Silos gibt es wieder einen kleinen Bereich, aus dem die Luft aus dem Stall herausgeblasen wird. Insgesamt greifen hier viele Faktoren ein, deren Zusammenspiel und einzelne Gewichtung nicht quantifiziert werden können, sodass es nur schwer möglich ist, die Begründung für genau dieses Strömungsphänomen bei diesen Randbedingungen zu finden. Die Hauptfaktoren sind sicherlich zum einen der unsymmetrische Aufbau innerhalb des Stalls. In der einen Stallhälfte befinden sich die Melkroboter und ein kleiner Liegeboxenbereich, der durch Wände und Gänge abgegrenzt ist. Zum anderen ist auch die Verteilung der Hinder-

nisse um den Stall herum nicht symmetrisch. Auf der einen Seite befinden sich die beiden Wäschertürme, die außerdem durch das Ausblasen der Reinluft eine lokale Luftquelle bilden und allein dadurch einen wesentlichen Beitrag zur unsymmetrischen Umströmung des Gebäudes liefern. Auf der anderen Seite steht das Technikgebäude mit anderen Abmaßen und Geometrien als die Luftwäscher. Ferner bilden auch die Futtersilos ein Hindernis, das eine Rückkopplung auf die Umströmung des Gebäudes bewirkt. Des Weiteren erzeugt die Wahl der Windschutznetzkonfiguration Bereiche, in denen die Luft stark verwirbelt wird und dreidimensionale Strukturen aufweist. Dies verdeutlicht neben der Komplexität der Strömungsvorgänge in und um den Stall herum auch die Notwendigkeit für mehr Forschungsarbeiten zur Erfassung und Bewertung der Um- und Durchströmung von frei belüfteten Stallanlagen gerade auch im Zusammenspiel mit verschiedenen Konfigurationen von Windschutznetzen und Jalousien.

5.5.3. Segment - natürliche Konvektion

Die Betrachtung der natürlichen Konvektion wurde für eine Sommer- ($T_0 = 30^\circ C$) und eine Wintersituation ($T_0 = 5^\circ C$) durchgeführt. Die übrigen Randbedingungen (Temperatur der Rinder, Ammoniakkonzentration auf den entsprechenden Flächen) wurden nicht verändert.

Zur Überprüfung des aufgebauten Modells wurde zunächst eine stationäre Simulation ohne den Einfluss einer Wärmequelle aufgebaut. Dies dient dazu, das Verhalten der Randbedingungen auf physikalische Plausibilität zu testen ohne die komplizierten Einflüsse der Auftriebsströmung berücksichtigen zu müssen. Folgende Punkte sollten dabei auftreten:

- Ein Geschwindigkeitsfeld mit der Geschwindigkeit 0 m/s und einer Abweichung davon im Bereich der numerischen Rundung
- Eine statische Druckverteilung, bei der eine Steigerung des Druckes mit abnehmender Höhe auftritt und der Druck am Boden in der Größenordnung $p = \rho gh$ liegt
- Eine konstante Dichteverteilung, aufgrund des inkompressiblen idealen Gases

In den Abbildungen 43 und 44 sind die Ergebnisse dieser Simulationen für die Sommer- und die Wintersituation dargestellt. Es ist zu erkennen, dass alle drei Kriterien erfüllt werden, womit das Modell verifiziert worden ist.

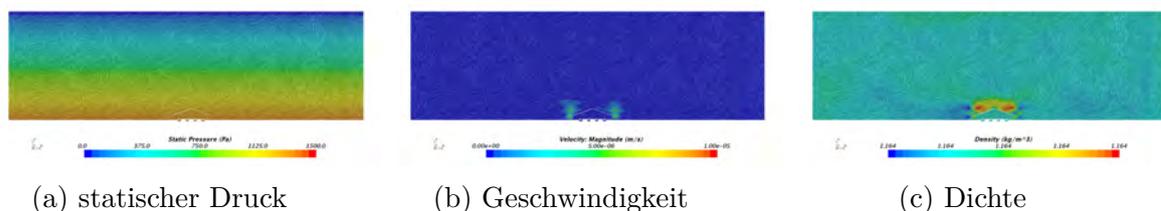


Abb. 43.: Ergebnisse der Validierungsrechnung zur Sommersituation der natürlichen Konvektion

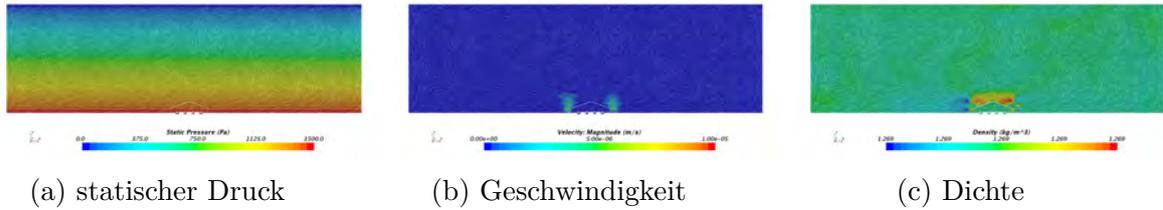


Abb. 44.: Ergebnisse der Validierungsrechnung zur Wintersituation der natürlichen Konvektion

Die eigentliche Simulation der natürlichen Konvektion wurde allerdings nicht stationär, sondern instationär gerechnet. Eine Kennzahl zur Bestimmung, ob es sich um einen stationären oder instationären Vorgang handelt, ist die Grashof-Zahl Gr nach Formel 5.8. Sie beschreibt das Verhältnis zwischen den hydrostatischen Auftriebs- und den Viskositätskräften eines Fluids.

$$Gr = \frac{g \cdot Be \cdot L^3 \cdot dT}{\nu^2} \quad (5.8)$$

Hierbei ist ν die kinematische Viskosität des Fluids. Die übrigen Variablen sind analog der Formel für die Richardson-Zahl definiert (vgl. Gl. 5.4). Für den Fall, dass $Gr > 1 \cdot 10^9$ ist, kann die Strömung als instationär betrachtet werden. Für einen Zylinder mit einer großen Länge gegenüber dem Durchmesser wird der Durchmesser als charakteristische Länge verwendet. Dies trifft in etwa für den hier vorliegenden Fall der Kuhkörper zu. Für die entsprechenden Werte der Wintersituation ergibt sich:

$$Gr_{Winter} = \frac{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1}{311,65 K} \cdot (1 m)^3 \cdot (311,65 K - 278,15 K)}{(17,083 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s})^2} \approx 3,6 \cdot 10^9 \quad (5.9)$$

Für die Sommersituation ergibt sich eine Grashof-Zahl von $Gr_{Sommer} \approx 0,9 \cdot 10^9$. In der Sommersituation liegt die Grashof-Zahl folglich knapp unterhalb des Grenzwertes. Zur besseren Vergleichbarkeit und aufgrund der nur geringen Abweichung wurde dennoch die Sommersituation ebenfalls instationär berechnet.

Ein Zeitschritt von $\Delta t = 0,1 s$ bildete hierbei einen guten Kompromiss zwischen Dauer der Rechnung und Genauigkeit/Konvergenz. Für die Sommer- und Wintersituation wurden zunächst 600 s ohne partielle Unterflurabsaugung simuliert. Anschließend wurde für weitere 600 s die Absaugung mit einem Volumenstrom von $\dot{V} = 82.000 m^3/h$ dazugeschaltet. Abbildung 45 zeigt die sich daraus ergebende Ammoniakverteilung für die Sommersituation.

In der Darstellung ohne Absaugung ist zu erkennen, dass die mit Ammoniak angereicherte Luft aufgrund der Auftriebsströmung aus dem Güllekeller gesogen wird. Sie verteilt sich im Stallraum und strömt an dessen Öffnungen nach draußen. Im unteren Bereich der Seitenwandöffnungen strömt frische Luft aus der Umgebung in den Stall mit einer Ammoniakkonzentration von 0 ppm nach. Sie sorgt für eine Verdünnung der Schadgaskonzentration in den äußeren unteren Dritteln des Stalls. Davon profitieren hier allerdings nur die Kühe, die ganz außen stehen. Wird die partielle Unterflurabsaugung dazugeschaltet, kann diese die Konzentration von Ammoniak im Oberflurbereich deutlich senken, indem die kontaminierte Luft im Güllekeller unterhalb des Spaltenbodens gehalten wird. Folglich sinkt auch der Ammoniakmassenstrom in die Umwelt. Es muss bedacht werden, dass die gezeigte Verteilung eine Momentaufnahme nach einer Zuschaltung der Unterflur-

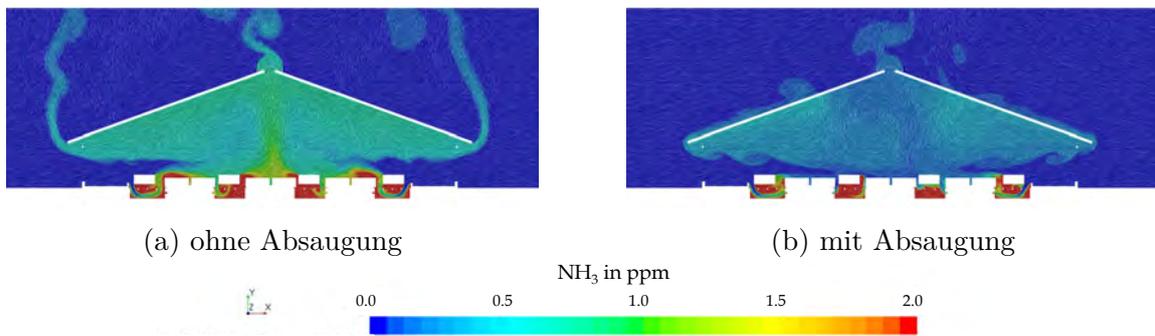


Abb. 45.: Darstellung des Schlierenbildes und der Ammoniakverteilung für die Sommersituation ($T_0 = 30^\circ\text{C}$) der natürlichen Konvektion nach 600 s ohne (links) und nach weiteren 600 s mit (rechts) partieller Unterflurabsaugung ($\dot{V} = 82.000\text{ m}^3/\text{h}$)

absaugung für 600 s ist und daher nicht den stationären Zustand der Ammoniakverteilung unter den gegebenen Randbedingungen zeigt. Es ist davon auszugehen, dass mit einem längeren Betrieb der Absaugung die Konzentration von Ammoniak im Stallinneren weiter sinkt, da fast gar keine belastete Luft aus dem Güllekeller in den Oberflurbereich strömt. Die Abbildungen 46 und 47 zeigen die Geschwindigkeits- und die Temperaturverteilung für die oben beschriebenen Situationen.

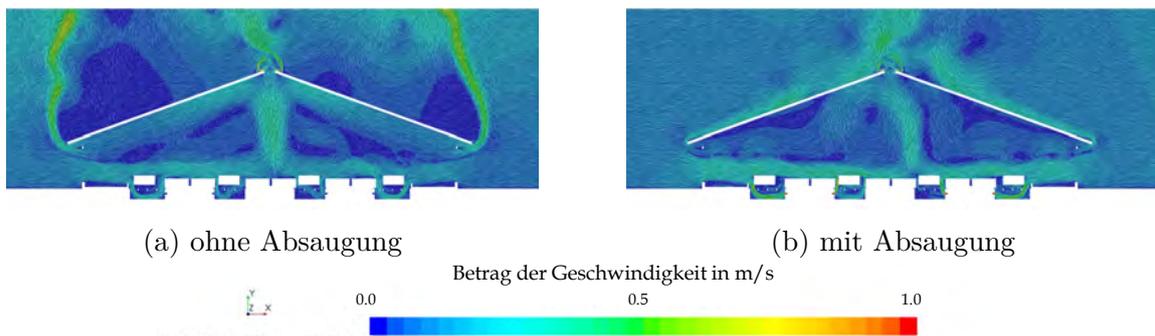


Abb. 46.: Darstellung des Schlierenbildes und der Geschwindigkeitsverteilung für die Sommersituation ($T_0 = 30^\circ\text{C}$) der natürlichen Konvektion nach 600 s ohne (links) und nach weiteren 600 s mit (rechts) partieller Unterflurabsaugung ($\dot{V} = 82.000\text{ m}^3/\text{h}$)

Es wurde erwartet, dass durch das Zuschalten der partiellen Unterflurabsaugung eine bessere Überströmung der Kühe und damit eine bessere Kühlung entstehen. Dies kann aus der Geschwindigkeitsverteilung nicht unmittelbar abgelesen werden. Die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Kuhkörper sind zwischen den Simulationen mit und ohne Absaugung ähnlich. Es muss allerdings angemerkt werden, dass die Simulationen mit einem sehr niedrigen Absaugvolumenstrom von nur $82.000\text{ m}^3/\text{h}$ durchgeführt wurden. Eine Steigerung des Absaugvolumenstroms würde hier die Strömungsgeschwindigkeit erhöhen. Dies hätte auch eine Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit im Oberflurbereich zur Folge. Erwartungsgemäß erhöht sich dabei auch die Überströmungsgeschwindigkeit der Kuhkörper. Dies muss in weiteren Forschungsvorhaben oder unter realen Bedingungen getestet werden.

Auch die Temperaturverteilung lässt bei dem hier gefahrenen Absaugvolumenstrom keine

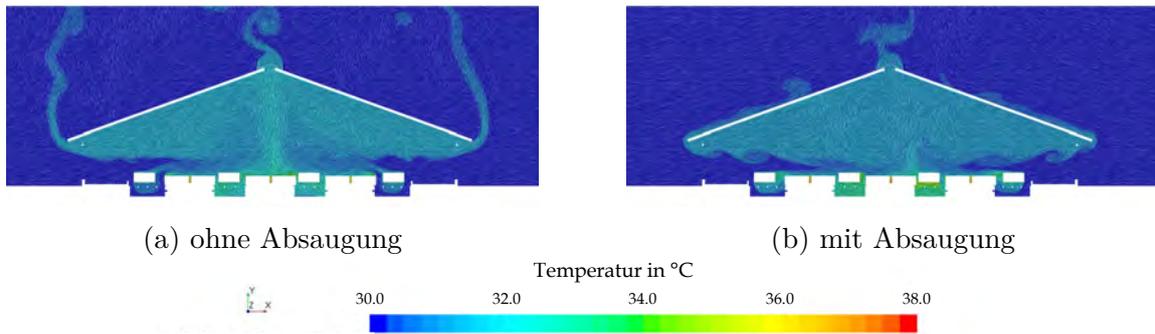


Abb. 47.: Darstellung des Schlierenbildes und der Temperaturverteilung für die Sommersituation ($T_0 = 30^\circ\text{C}$) der natürlichen Konvektion nach 600 s ohne (links) und nach weiteren 600 s mit (rechts) partieller Unterflurabsaugung ($\dot{V} = 82.000\text{ m}^3/\text{h}$)

positive Wirkung der Unterflurabsaugung auf die Abfuhr der Wärme erkennen. Allerdings herrscht zwischen der Temperatur der Kühe und der Umgebungstemperatur nur ein Unterschied von $8,5^\circ\text{C}$, sodass bei einem Temperaturniveau von durchschnittlich $\bar{T} \approx 31^\circ\text{C}$ im Stallinneren bei einer Umgebungstemperatur von $T_0 = 30^\circ\text{C}$ wenig Raum für Verbesserung herrscht. Eine grundsätzliche Aussage kann hier aufgrund der geringen Datenlage von nur einer durchgeführten Simulation mit einer begrenzten zeitlichen Auflösung schwer getroffen werden.

Abbildung 48 zeigt die Ammoniakverteilung für die Wintersituation.

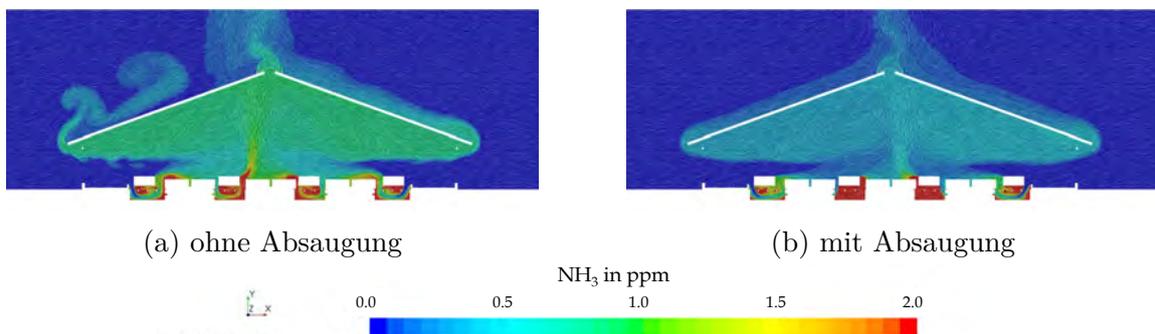


Abb. 48.: Darstellung des Schlierenbildes und der Ammoniakverteilung für die Wintersituation ($T_0 = 5^\circ\text{C}$) der natürlichen Konvektion nach 600 s ohne (links) und nach weiteren 600 s mit (rechts) partieller Unterflurabsaugung ($\dot{V} = 82.000\text{ m}^3/\text{h}$)

Aufgrund des höheren Temperaturunterschiedes zwischen der Umgebungsluft und den Kühen (hier $\Delta T = 33,5^\circ\text{C}$) entsteht eine stärkere Auftriebsströmung, die ohne Absaugung mehr Ammoniak aus dem Güllekeller nach oben zieht als im Sommer. Die nachströmende Luft von außen hat hier aufgrund des höheren Impulses eine größere Reichweite Richtung Stallmitte. Das grundlegende Verhalten der Strömung ist ansonsten analog zu dem in der Sommersituation.

Der Zusammenhang zwischen Temperaturdifferenz und Stärke der Auftriebsströmung wird bei der Auswertung der Volumenströme an den oberflur liegenden Auslässen des Stalls (Seitenwandöffnungen und Firstlüftung) zu den jeweiligen Jahreszeiten deutlich. In Tabelle 6 sind die entsprechenden Ströme, die den Stall durch diese Öffnungen heraus verlassen, mit und ohne Einfluss der Unterflurabsaugung nach jeweils 600 s aufgezeigt.

Sommer ($\Delta T = 8,5^\circ C$)	$\dot{V}_{Ausl\u00e4sse}$ in $\frac{m^3}{h}$
ohne Abs.	2.557
mit Abs.	1.291
Winter ($\Delta T = 33,5^\circ C$)	$\dot{V}_{Ausl\u00e4sse}$ in $\frac{m^3}{h}$
ohne Abs.	5.104
mit Abs.	4.324

Tab. 6.: Gegen\u00fcberstellung der resultierenden Volumenstr\u00f6me aus dem Stall heraus unter dem Einfluss einer Auftriebsstr\u00f6mung zu verschiedenen Jahreszeiten in Abh\u00e4ngigkeit der partiellen Unterflurabsaugung mit einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 84.000 m^3/h$ nach jeweils 600 s

Die im Winter herrschende st\u00e4rkere Auftriebsstr\u00f6mung verursacht folglich auch einen h\u00f6heren Volumenstrom aus dem Stall heraus. Hier zeigt sich au\u00dferdem der Einfluss der Unterflurabsaugung. Sie senkt den generierten Volumenstrom aus dem Stall heraus und sorgt bereits dadurch f\u00fcr eine Reduzierung der Emissionen.

Aufgrund der st\u00e4rkeren Auftriebsstr\u00f6mung im Winter wird allerdings bei gleichem Absaugvolumenstrom keine so starke Emissionsminderung wie im Sommer erzielt (vgl. Abbildung 51).

In den Abbildungen 49 und 50 sind die Geschwindigkeits- und Temperaturverteilungen f\u00fcr die Wintersituation dargestellt.

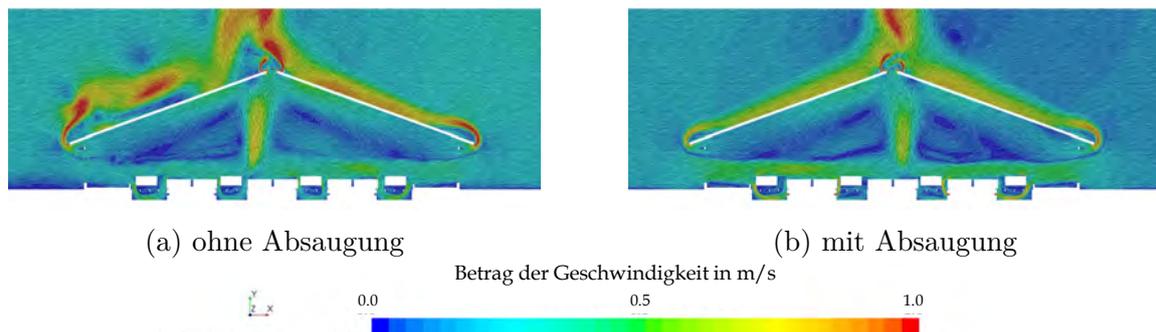


Abb. 49.: Darstellung des Schlierenbildes und der Geschwindigkeitsverteilung f\u00fcr die Wintersituation ($T_0 = 5^\circ C$) der nat\u00fcrlichen Konvektion nach 600 s ohne (links) und nach weiteren 600 s mit (rechts) partieller Unterflurabsaugung ($\dot{V} = 82.000 m^3/h$)

In der Geschwindigkeitsverteilung zeigt sich deutlich der h\u00f6here Impuls der Str\u00f6mung. Durch die Unterflurabsaugung sind Tendenzen zu einer besseren Umstr\u00f6mung der Kuhk\u00f6rper zu erkennen. Sie sind allerdings zu gering, um daraus eindeutige Aussagen ableiten zu k\u00f6nnen. Auch hier wird erwartet, dass durch eine Steigerung des Absaugvolumenstroms Verbesserungen in dieser Hinsicht erzielt werden k\u00f6nnen.

Aufgrund der h\u00f6heren Temperaturdifferenz in der Rechenumgebung kann allerdings eine positive Wirkung auf die Temperaturverteilung im Stallinneren erkannt werden. Durch die Unterflurabsaugung str\u00f6mt mehr frische k\u00fchle Luft nach, wodurch die Durchschnittstemperatur im Stallinneren weiter sinkt. Dies ist allerdings im Winter aufgrund der insgesamt niedrigeren Temperatur von untergeordneter Bedeutung.

Eine Gesamt\u00fcbersicht \u00fcber das Verhalten des Ammoniakmassenstroms in die Umwelt unter Bedingungen nat\u00fcrlicher Konvektion bietet das Balkendiagramm in Abbildung 51.

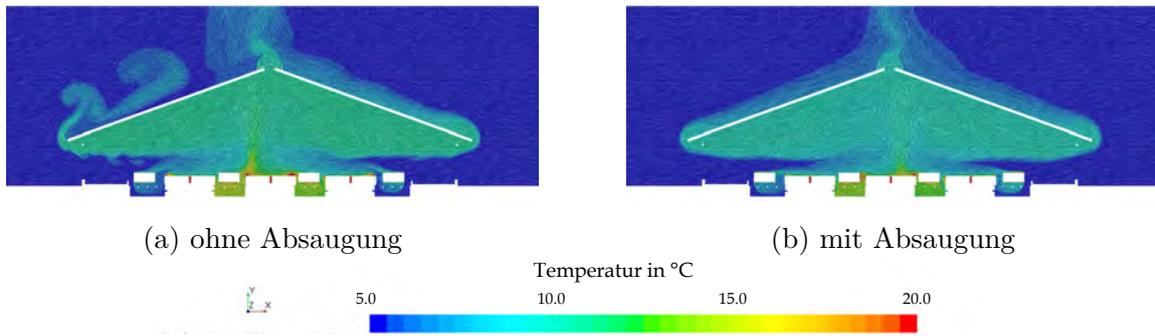


Abb. 50.: Darstellung des Schlierenbildes und der Temperaturverteilung für die Wintersituation ($T_0 = 5^\circ\text{C}$) der natürlichen Konvektion nach 600 s ohne (links) und nach weiteren 600 s mit (rechts) partieller Unterflurabsaugung ($\dot{V} = 82.000\text{ m}^3/\text{h}$)

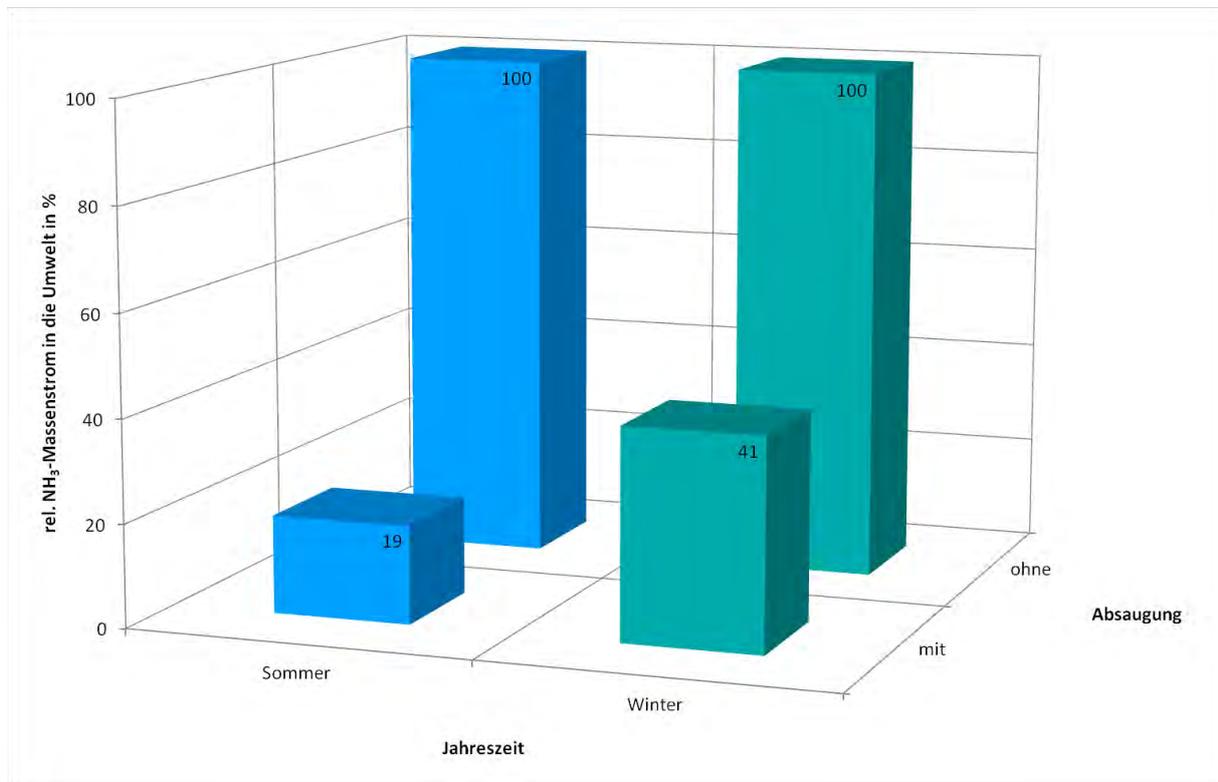


Abb. 51.: Balkendiagramm zum Vergleich des Ammoniakmassenstroms in die Umwelt aus dem Gesamtstall für eine Sommer- ($T_0 = 30^\circ\text{C}$) und eine Wintersituation ($T_0 = 5^\circ\text{C}$) ohne und mit partieller Unterflurabsaugung mit einem Absaugvolumenstrom von $\dot{V} = 82\,000\text{ m}^3/\text{h}$

Aufgrund des sehr geringen Ammoniakmassenstroms im Vergleich zu einem Stall mit erzwungener Konvektion ist hier kein Vergleich zu diesem wie in den Balkendiagrammen der vorherigen Untersuchungen abgebildet, da er das Ergebnis stark verzerren würde. Es wurde außerdem eine Auswertung pro Jahreszeit durchgeführt. Das bedeutet, dass die relativen Werte ohne Absaugung für die Sommer- und die Wintersituation nicht auf den gleichen absoluten Werten beruhen. Aufgrund der oben erwähnten stärkeren Auftriebsströmung und den daraus resultierenden höheren Volumenströmen (vgl. Tab. 6) sind bei gleichen Ammoniakkonzentrationen auf den Oberflächen die absoluten Ammoniakmassenströme in die Umwelt im Winter höher als im Sommer.

Es zeigt sich folglich, dass bei gleichem Absaugvolumenstrom die Minderung im Winter aufgrund des höheren Impulses der Auftriebsströmung, gegen den die Absaugung arbeiten muss, geringer ist. Dennoch bietet die partielle Unterflurabsaugung auch für den Fall einer Schwachwindlage eine gute Möglichkeit, die Ammoniakemissionen des Stalls zu reduzieren.

5.5.4. Fehlerbetrachtung

Die Qualität einer numerischen Simulation hängt von vielen Faktoren ab. Zu nennen sind hier unter anderem die Feinheit des Netzes und der räumlichen Diskretisierung, die Qualität des Netzes, die Auswahl der numerischen Modelle in Abhängigkeit der Strömungssituation, der Verlauf der globalen Residuen und die Konvergenz wichtiger Parameter zur Beurteilung der physikalischen Richtigkeit des Ergebnisses (diese hängen von der jeweiligen Fragestellung ab), die Wahl der Randbedingungen oder der Initialisierung. Beschränkt man sich beispielsweise auf die globalen Residuen, so wird häufig ein Wert von drei oder vier Zehnerpotenzen, die diese zur Erreichung der Lösung sinken müssen, angegeben. Es ist jedoch auch möglich, dass die Residuen nicht so weit sinken, aber die Lösung trotzdem physikalisch richtig ist und der Realität entspricht. Gleichzeitig kann eine Simulation mit perfektem Netz und perfekter Konvergenz trotzdem abweichende Ergebnisse von den Validierungsdaten liefern, wenn die falschen numerischen Modelle ausgewählt worden sind. Hier wird deutlich, dass eine genaue Fehlerbetrachtung ohne Validierungsdaten, die exakt die Situation in der Simulation widerspiegeln, nicht möglich ist. Daher ist es umso wichtiger, dass in einem Folgeprojekt oder in Windkanalversuchen explizit auf die hier untersuchten Fragestellungen eingegangen wird.

Die Validierung der Simulationsergebnisse anhand ausgewählter Publikationen und der darin enthaltenen Windkanalversuche zeigte eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment, auch wenn die betrachteten Fragestellungen nicht exakt übereinstimmten. Es ist aber trotzdem davon auszugehen, dass die hier erzielten positiven Ergebnisse in dieser Größenordnung in der Realität erreicht werden können. Die größte Unsicherheit bildet dabei allerdings die Instabilität des Wetters. Die Simulationen sind immer von einem konstanten Wind aus einer konstanten Richtung ausgegangen. Dies wird es in der Natur nicht geben. Diesem Umstand wurde durch die Betrachtung von verschiedenen Windgeschwindigkeiten und -richtungen bei gleichen Absaugvolumenströmen versucht entgegenzutreten.

Des Weiteren wurde der Einfluss von Luftfeuchtigkeit in den Simulationen nicht berücksichtigt und stellt demnach eine Fehlerquelle dar. Gleiches gilt für den Einfluss der Körpertemperatur der Kühe. Zwar wurde dieser in den Simulationen zur natürlichen Konvektion modelliert, allerdings ohne Übertragungsverhalten aufgrund der Haut oder der Haare der Kühe. Hier wird aber eher von einer Überbewertung der Kuhtemperatur ausgegangen, sodass die partielle Unterflurabsaugung in der Simulation gegen einen höheren Widerstand arbeiten muss.

Die Simulationen der Windschutznetze wurden ohne Validierung des Windbrechmechanismus durchgeführt. Hier wurde in der Simulation ein Wert abgeschätzt und verwendet. Im Fokus dabei stand ein genereller erster Einblick in das Zusammenspiel zwischen Windbrechung und partieller Unterflurabsaugung. Ziel war hier nicht die genaue Darstellung vom Verhalten der Windschutznetze und Jalousien.

Grundsätzlich stand in diesem Projekt die Darstellung des Potentials der partiellen Un-

terflurabsaugung in einem frei belüfteten Rinderstall im Fokus. Trotz der Fehlerquellen und Unsicherheiten kann davon ausgegangen werden, dass die Größenordnungen der Ergebnisse in die Realität übertragen werden können.

5.6. AP 6 (NBS): Kostenkalkulation

Parallel zu den Arbeiten am Institut für Agrartechnologie hat die NBS eine Kostenkalkulation für den betrachteten Stall aufgestellt. Demnach belaufen sich die Kosten für solch einen Bau ohne partielle Unterflurabsaugung auf 2.125.030,00 €. Durch Integration einer partiellen Unterflurabsaugung erhöht sich dieser Betrag auf 2.801.279,34 €. Eine Abluftreinigungsanlage ist in diesen Kosten nicht berücksichtigt. Im Anhang befinden sich in den Darstellungen 72 bis 78 detaillierte Kostenberechnungen für beide Fälle.

5.7. AP 7 (AT und NBS): Berichterstattung

In diesem Abschnitt wird auf die bisherigen Bemühungen eingegangen, das Projekt zu veröffentlichen oder auszustellen.

5.7.1. Eurotier

Vom 13.11.2018 bis zum 16.11.2018 wurde das Projekt auf der Eurotier in Hannover vorgestellt. Hierzu sind ein dreidimensionales Modell des Stallsegmentes im Maßstab 1:32 und ein Poster zur Projektdarstellung und -erläuterung erstellt worden. Das Poster findet sich in Abbildung 66. Zur Darstellung des Vergleiches zwischen einem Stall mit und ohne Unterflurabsaugung wurden die gleichen Simulationen verwendet, die in Abbildung 21 dargestellt sind. Für das Stallmodell wurden die Spaltenbodenelemente, die Liegeboxen und der Güllekeller nach der CAD-Zeichnung des Stalls im 3D-Drucker gefertigt. Die hausinterne Werkstatt stellte Dachkonstruktion, Beleuchtung, Gitter und weitere Anbauten her und montierte schließlich das Gesamtmodell. Ergänzt wurde dieses durch Figuren, Kühe und einen Trecker zur Futtervorlage eines Spielzeugwarenherstellers. Die Gülle sowie das Erdreich wurden durch Styropor dargestellt, das in entsprechenden Farben lackiert wurde. Ein Bild des Stallmodells findet sich in der folgenden Abbildung 52.

In Gesprächen gab es zudem wichtigen Input für die Funktionalität der Unterflurabsaugung. Ein Kollege der Firma Ziehl-Abegg SE, deren Ventilatoren im Projekt verwendet werden, gab den wichtigen Hinweis, dass der im Modell dargestellte Abluftkanal, der die Luft zu dem Luftwäscher führt, zu klein dimensioniert ist. So kommt es aller Voraussicht nach zu großen Druckverlusten, die die Performance der gesamten Absaugung verschlechtern werden. Dieser Punkt konnte bei weiteren Gesprächen mit der NBS aufgenommen und in die Planung eines Folgeprojektes integriert werden.



Abb. 52.: Blick auf das Stallmodell, das bei der EuroTier ausgestellt wurde

5.7.2. ATB Summerschool

Vom 17.09.2019 bis zum 20.09.2019 fand in Potsdam die vom Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie (ATB) organisierte internationale Summerschool zum Thema „Ammonia, greenhouse gas and aerosol transmission from livestock systems: An interdisciplinary approach on measuring, modelling and mitigation“ statt. Neben einer Exkursion zu einem Rinderstall und einer Vorführung der dort verwendeten Messtechnik der Forschergruppe des ATB wurden in workshops und Vorträgen verschiedene Methoden und Techniken zur Messung und Minderung von Emissionen aus Tierhaltungsanlagen vorgestellt. Jeder Teilnehmer konnte außerdem mit einem Poster seine eigene Projektarbeit vorstellen. Hier wurde nochmals das Poster von der EuroTier verwendet, allerdings in einer englischen Fassung.

5.7.3. BTU-Tagung

Die Projektgruppe konnte erneut mit einem Poster an der 14. internationale Tagung „Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung“ vom 24. bis 26. September 2019 an der Universität Bonn teilnehmen. Durch eine Kurzvorstellung im Plenum von fünf Minuten wurde ein kurzer Einblick in die Technik und Wirkungsweise der partiellen Unterflurabsaugung in einem frei belüfteten Rinderstall gegeben. Darüber hinaus wurden in den Pausen interessante Gespräche am Stand mit dem Poster geführt. Im Tagungsband ist ein paper zum Thema veröffentlicht worden (Hartje und Linke (2019)). Zusätzlich wurde ein Handout vorbereitet, das sich jeder Interessierte unter dem Poster nehmen konnte. Die Vorderseite des DIN-A4-Blattes zeigte dabei das Poster und auf der Rückseite fanden sich weitere Ergebnisse und Diskussionspunkte. Das Handout ist im Anhang in den Abbildungen 66 (Poster) und 67 (Rückseite) dargestellt und wurde bei der Konferenz dankend angenommen.

Bereits im Vorfeld der Konferenz fand zum ersten Mal ein Methodenworkshop statt, bei dem ForscherInnen aus dem Bereich der Emission aus Tierhaltungsanlagen ihre Techniken und Projekte vorstellten. Hier konnte bereits in einem kleineren Rahmen die Technik der Strömungssimulation vorgestellt und beispielhaft auf die partielle Unterflurabsaugung eingegangen werden.

5.7.4. Förderkreis Stallklima

Im Rahmen eines Vortrages bei der Tagung des Förderkreises Stallklima am 01. und 02.10.2019 in Raumberg-Gumpenstein (Österreich) konnte ein weiteres Publikum für die partielle Unterflurabsaugung in frei belüfteten Rinderställen sensibilisiert werden.

5.7.5. Weitere Kurzvorträge und Ausstellung des Stallmodelles

Beim innerhalb des Thünen-Institutes stattfindenden Themenfeldtreffen „Nutztierhaltung und Aquakultur“, bei dem alle Arbeitsgruppen zusammenkommen, die sich in diesem Themenfeld befinden, konnten am 28. und 29. August 2019 in einem Kurzvortrag zum vorliegenden Projekt die bis dahin erzielten Ergebnisse vorgestellt werden. Außerdem wurde im Rahmen der Institutsführung (das Treffen fand im Institut für Agrartechnologie statt) das für die EuroTier erstellte Stallmodell präsentiert, sodass die im Vortrag zuvor dargestellten Zusammenhänge veranschaulicht werden konnten.

Eine weitere Gelegenheit zur Vorstellung des Modells bot sich beim Arbeitsgruppentreffen des KTBL-Projektes EmiDaT (KTBL (2018)) im Institut für Agrartechnologie am 07. und 08.10.2019. Das Projekt befasst sich mit der Sammlung von Emissionsdaten von Tierhaltungsanlagen um darauf aufbauend die Umweltbelastungen von solchen Anlagen besser abschätzen zu können. In diesem Rahmen fand eine Führung durch das Institut statt, bei der thematisch passend das Modell des frei belüfteten Rinderstalls mit partieller Unterflurabsaugung vorgestellt werden konnte.

6. Fazit

Mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation hat das Projekt gezeigt, dass die partielle Unterflurabsaugung zur Senkung der Emissionen und Verbesserung des Tierschutzes bei natürlich belüfteten Rinderställen beitragen kann.

Das Projektkonsortium aus Mitarbeitern des Thünen-Instituts für Agrartechnologie (AT) und der Norddeutschen Bauernsiedlungs GmbH (NBS) haben gemeinsam ein Stallkonzept erarbeitet, das den Einbau einer partiellen Unterflurabsaugung ermöglicht. Der Stall basiert auf einem Entwurf der NBS zu einem modernen frei belüfteten Boxenlaufstall mit Spaltenböden auf den Laufwegen und eingestreuten Liegeboxen.

Aufgrund der Vorgaben aus AT erstellte die NBS eine Bauzeichnung, die im Laufe des Projekts dem jeweiligen Erkenntnisstand aus den Simulationsergebnissen angepasst wurde. Am Ende des Projekts steht eine fertige Bauzeichnung für einen funktionsfähigen Boxenlaufstall mit integrierter partieller Unterflurabsaugung für 255 Milchkühe.

Die Baukosten des herkömmlichen Stalls von 2.125.030,00 € erhöhen sich für den Stall mit partieller Unterflurabsaugung auf 2.801.279,34 €. Hier sind die Kosten für die nachgeschaltete Abluftreinigungsanlage noch nicht enthalten.

Für die Durchführung der notwendigen numerischen Simulationen mit dem Programm Star-CCM+ von Siemens PLM wurden viele Einstellungsvarianten erprobt, Vernetzungsrichtlinien festgelegt und Testläufe durchgeführt. Dies war nötig, um vergleichbare, reproduzierbare Ergebnisse erzeugen zu können. Gleichzeitig wurde aber auch die Routine gesteigert, um die Anzahl der erforderlichen Berechnungen in der vorgegebenen Projektdauer bewältigen zu können. Während der Projektlaufzeit wurde am Rechenzentrum des Thünen-Instituts ein Großrechner eingerichtet, der die Rechenkapazität des zu Beginn des Projekts zur Verfügung stehenden Arbeitsplatzrechners um ein Vielfaches steigerte und so zum großen Umfang des Berichts beiträgt. Alle diese Maßnahmen werden dem AT auch bei zukünftigen Projekten, die numerische Simulationen beinhalten, helfen.

Die Schwierigkeit, die Geometrie des realen Stalls in den digitalen Zwilling innerhalb der numerischen Simulation zu überführen, wurde durch die Verwendung des internen 3-D CAD-Tools von Star-CCM+ bewältigt. Hier zahlten sich die vielen Festlegungen aus, die im Anfangsstadium des Projekts erarbeitet wurden. Die weit auseinander liegenden Abmessungen von z. B. der Spaltenbreite 35 mm bis zum Durchmesser des umgebenden Luftraums von 315 m konnten so automatisch diskretisiert und mit Randbedingungen beaufschlagt werden.

Die Ergebnisse der numerischen Simulation zeigen eine starke NH_3 -Massenstromreduktion vom Stall in die Umwelt. Diese beträgt bei einer Anströmung normal zum First und geöffneten Jalousien bis zu 96 %. Aber auch für wechselnde Bedingungen, seien es unterschiedliche Windrichtungen und -geschwindigkeiten, verschiedene Stellungen der Windschutznetze oder Situationen ganz ohne Wind wurde ein hohes Emissionsminderungspotential und eine Verringerung der Schadgasbelastung im Atembereich der Tiere gefunden. Im Zusammenhang mit Schwachwindlagen konnte in diesem Projekt aufgrund der geringen Datenlage (es wurde nur je eine Simulation für Sommer und Winter gerechnet) keine Aussage zur Verbesserung der Wärmeabfuhr der Tiere gemacht werden. Bei dem vergleichsweise geringen simulierten Absaugvolumenstrom wird aber erwartet, dass mit dessen Steigerung auch eine deutlich gesteigerte Abfuhr der Wärme aus dem Stallinneren vor allem im Sommer erreicht werden kann. Dies ist jedoch auch abhängig von der nachströmenden Umgebungstemperatur. Nicht betrachtet wurde in diesem Zusammenhang die Verteilung

und mögliche Reduzierung der Luftfeuchtigkeit.

Zu bedenken bleibt, dass die Ergebnisse der numerischen Simulation lediglich das theoretische Potential einer solchen Absaugung aufzeigen. Die Ergebnisse müssen daher durch Versuche in der Praxis validiert werden.

Insgesamt liefert der vorliegende Bericht einen guten Überblick über verschiedene Szenarien im Zusammenhang einer partiellen Unterflurabsaugung in einem frei belüfteten Rinderstall und den damit verbundenen Minderungspotentialen der Ammoniakemissionen.

Mit Hilfe der numerischen Strömungsmechanik ist es möglich, in kurzer Zeit eine Vielzahl von verschiedenen Randbedingungen an einem erstellten geometrischen Modell zu untersuchen. Hierdurch können lange und teure Versuchsreihen optimiert oder teilweise eingespart werden.

6.1. Ausblick

Die begonnenen Gespräche mit Vertretern aus der Industrie im Bereich der Abluftreinigungsanlagen werden fortgeführt. Ziel ist es, einen Partner für ein Folgeprojekt zu gewinnen. In diesem Projekt soll ein frei belüfteter Rinderstall mit integrierter partieller Unterflurabsaugung gebaut und messtechnisch untersucht werden. Dies gilt zum einen der Validierung und Überprüfung der theoretischen Ergebnisse aus den Simulationen aber auch der Erprobung der Technik in der Praxis. Hier soll unter anderem die Regelung der Absaugung in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit und -richtung getestet werden. Es muss ein Kompromiss zwischen einer Berücksichtigung von sich ändernden Randbedingungen und der beispielsweise daraus resultierenden Belastung der mechanischen Teile gefunden werden. Bei einer Steuerung mit einer hohen Abtastrate reagiert die Lüftung auf sehr kleine und damit häufige Änderungen in der Windgeschwindigkeit und -richtung. Hierdurch erfahren die mechanischen Teile eine hohe Anzahl an Lastwechseln und Bewegungen, wodurch ein schnellerer Verschleiß eintreten kann. Dies ist eines von vielen Details, die bei der praktischen Umsetzung der partiellen Unterflurabsaugung untersucht und erprobt werden müssen. Unter allgemeineren Gesichtspunkten gilt es zunächst einen Kompromiss zwischen der Wäscherbelastung, dem Stromverbrauch und der Emissionsreduzierung zu finden. Letztere, das haben die Simulationen gezeigt, ist am höchsten, wenn die Ventilatoren die gesamte Zeit über ihren maximalen Volumenstrom fördern. Dies wäre allerdings nicht wirtschaftlich und würde das gesamte System ad absurdum führen, da zwar eine Emission (NH_3) gesenkt werden würde, aber eine andere (CO_2) über den erhöhten Strombedarf, sofern er nicht durch erneuerbare Energien gedeckt wird, gesteigert werden würde. Die Wäscherbelastung ist ebenfalls begrenzt, sodass der optimale Betriebspunkt im Zusammenspiel aller Komponenten gefunden werden muss.

Sollte es nicht möglich sein, ein solches Folgeprojekt zu realisieren, ist es denkbar, skalierte Versuche im Windkanal durchzuführen, um die Ergebnisse aus der Simulation zumindest teilweise validieren zu können. Hierzu gab es bereits erste Überlegungen theoretischer Natur.

Durch die Heterogenität der untersuchten Randbedingungen ist es wünschenswert, in jedem Bereich noch weitere und tiefergehende Untersuchungen und Simulationen durchzuführen. Vor allem im Bereich der Windschutznetze und der natürlichen Konvektion 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 oder zum generellen Einfluss verschiedener Steuerungskonzepte der Windbrechmechanismen auf die Durchströmungscharakteristik eines frei belüfteten Stalls.

Unabhängig von diesem Projekt soll allgemein der Nutzen der Numerik im Entwicklungsprozess von Techniken und Prozessen in der Landwirtschaft durch weitere Projekte stärker ins Bewusstsein der Akteure gebracht werden.

Literaturverzeichnis

- Adrion, F. (2012). Simulation der Luftströmung in Mastschweinställen mit unterschiedlicher Zuluftführung. Masterarbeit, Hohenheim: Universität.
- Bjerg, B. und 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). [online] https://www.researchgate.net/publication/270886018_Numerical_simulation_of_a_pit_exhausts_system_for_reduction_of_ammonia_emission_from_a_naturally_ventilated_cattle_building - letzter Zugriff am 10.01.2020.
- BMEL (2019). Julia Klöckner: "Landwirtschaft und Gesellschaft versöhnen". Pressemitteilung Nr. 210/2019 [online] <https://www.bmel.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2019/210-bauerndemonstrationen.html> - letzter Zugriff 29.04.2020.
- Caduff, A. (2020). Stallklima überprüfen! [online] <https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/dvs/lbbz/beratungsfachwissen/tierhaltung/kuhsignale/Documents/Stallklima.pdf> - letzter Zugriff am 11.02.2020.
- Choinière, Y., Blais, F., und Munroe, J. A. (1988). Wind tunnel study of airflow patterns in a naturally ventilated building. *CBE Journal*, 30:293–297. [online] http://www.csbe-scgab.ca/docs/journal/30/30_2_293_ocr.pdf - letzter Zugriff 12.02.2020.
- Choinière, Y. und Munroe, J. A. (1994). A wind tunnel study of wind direction effects on airflow patterns in naturally ventilated swine buildings. *CBE Journal*, 36:93–101. [online] http://csbe-scgab.ca/docs/journal/36/36_2_93_ocr.pdf - letzter Zugriff 12.02.2020.
- CIGR (2002). Climatization of Animal Houses: Heat and moisture production at animal and house levels. Technical Report 4, Research Centre Bygholm, Danish Institute of Agricultural Sciences, Horsens, Dänemark. [online] http://www.cigr.org/documents/CIGR_4TH_WORK_GR.pdf - letzter Zugriff am 14.01.2020.
- De Paepe, M. (2014). *Experimental and model-based study of airflows and ammonia distribution in and around animal houses*. PhD thesis, Ghent University, Belgium. ISBN: 978-90-5989-698-7.
- DIN 18910-1:2004-11 (2004). Wärmeschutz geschlossener Ställe - Wärmedämmung und Lüftung - Teil 1: Planungs- und Berechnungsgrundlagen für geschlossene zwangsbelüftete Ställe.
- DIN EN 12737:2008-02 (2008). Betonfertigteile - Spaltenböden für die Tierhaltung; Deutsche Fassung EN 12737:2004+A1:2007.

- DLG (2015). Überblick über den DLG-Prüfrahmen „Abluftreinigungssysteme für Tierhaltungsanlagen“. [online] http://2015.dlg.org/fileadmin/downloads/tests/Abluftreinigung_Tierhaltung.pdf - letzter Zugriff am 15.03.2017.
- DLG AgroFood Medien GmbH (2019). Fiebermessen - ein effizientes Frühwarnsystem für den Rinderstall. [online] <https://www.kuhgesundheits.de/2019/08/27/fiebermessen-im-rinderstall/> - letzter Zugriff am 08.01.2020.
- EG-Öko-Basisverordnung Nr. 834 (2007). EG-Öko-Basisverordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates vom 28. Juni 2007 über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 2092/91, ABl. Nr. L 189 vom 20.07.2007.
- EG-Verordnung Nr. 889 (2008). Verordnung (EG) Nr. 889/2008 der Kommission vom 5. September 2008 mit Durchführungsvorschriften zur Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen hinsichtlich der ökologischen/biologischen Produktion, Kennzeichnung und Kontrolle, ABl. Nr. L 250 vom 18.09.2008.
- Etlinger, G. (2017). Lüftungsfehler im Rinderstall erkennen und beheben. [online] <https://noe.lko.at/lueftungsfehler-im-rinderstall-erkennen-und-beheben+2500+2624406> - letzter Zugriff am 11.02.2020.
- Eurich-Menden, B. (2012). Ammoniak-Emissionsfaktoren und Minderungsmaßnahmen - Milchkuh-, Mastschweine- und Legehennenhaltung. Technical report, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL). [online] https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/artikel/Tierhaltung/Allgemeines/Ammoniak-Emissionsfaktoren/Ammoniak-Emissionsfaktoren.pdf - letzter Zugriff am 02.01.2019.
- Hackelsperger, F. (2018). Persönliches Gespräch.
- Hahne, J. (2018). Persönliches Gespräch.
- Hahne, J., Linke, S., und Vorlop, K.-D. (2016). Ammoniakemissionen aus der Tierhaltung: Umfang und Minderungsoptionen. *Jb Agrartechnik Yearbook Agric Eng 2015*, pages 204–213. [online] <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00055137> - letzter Zugriff am 15.03.2017.
- Hartje, J. und Linke, S. (2019). Die partielle Unterflurabsaugung zur Senkung der Emissionen und Verbesserung des Tierschutzes bei natürlich belüfteten Rinderställen. In *14. Tagung: Bau, Technik und Umwelt 2019 in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung*, pages 75–81. KTBL.
- Hempel, S., Wiedemann, L., Ammon, C., Fiedler, M., Saha, C., Janke, D., Loebstin, C., Fischer, J., Amon, B., Hoffmann, G., Menz, C., Zhang, G., Halachmi, I., Del Prado, A., Estelles, F., Berg, W., Brunsch, R., und Amon, T. (2015). Bestimmung der Durchströmungscharakteristik frei gelüfteter Milchviehställe zur Optimierung des Stallklimas

- Determine the through-flow characteristics of naturally ventilated dairy barns to optimise barn climate. In *12. Tagung: Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung 2015*.
- HUESKER Synthetic GmbH (2020). Agrar. [online] <https://www.huesker.de/produkte/agrar.html> - letzter Zugriff am 07.01.2020.
- Krause, K.-H. (2012). EP 2181583 B1.
- Krause, K.-H. und Linke, S. (2011). Systematisierung des Emissionsverhaltens von Offenställen - hier am Beispiel eines Boxenlaufstalles mit Sheddach. *10. Tagung: Bau, Technik und Umwelt 2011 in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung*, pages 197–203.
- Krause, K.-H., Müller, H.-J., Mußlick, M., und Linke, S. (2010). Mit intelligenter Lüftung gehen Tiergesundheit, Umweltschutz und Energieeinsparung zusammen. *Landtechnik 1*, pages 15–19.
- KTBL (2018). Ermittlung von Emissionsdaten für die Beurteilung der Umweltwirkungen der Nutztierhaltung (EmiDaT). [online] <https://www.ktbl.de/themen/emidat/> - letzter Zugriff am 06.01.2020.
- Landwirt.com GmbH (2009). Fiebermessen - ein absolutes Muss! [online] <https://www.landwirt.com/Fiebermessen—ein-absolutes-Muss,,7136,,Bericht.html> - letzter Zugriff am 08.01.2020.
- Lindena, T., Tergast, H., Ellßel, R., und Hansen, H. (2018). Steckbriefe zur Tierhaltung in Deutschland: Milchkühe. [online] https://www.thuenen.de/media/ti-themenfelder/Nutztierhaltung_und_Aquakultur/Haltungsverfahren_in_Deutschland/Milchviehhaltung/Steckbrief_Milchkuehe2018_final_2.pdf - letzter Zugriff am 12.12.2018.
- Linke, S. (1999). 17. CAD-FEM USERS' MEETING. In *Numerische Simulation im Dienst der Landwirtschaft*, page I.2.8. CAD-FEM GmbH.
- Linke, S., Hinz, T., Krause, K.-H., Hahne, J., und Winter, T. (2012). Possible means of reduction of airborne pollutants in and from poultry houses. In *Ninth International Livestock Environment Symposium*, pages 1–6. Paper Number: ILES 12-0833.
- Mendes, L. B., Rocha, K. S. O., Azevedo, E. L., Tinôco, I. d. F. F., Ogink, N. W. M., van Dooren, H. J. C., Mosquera, J., und Osorio S., J. A. (2014). Air motion patterns in a naturally ventilated dairy barn by means of a CFD model combined with the carbon dioxide mass balance method. In *International Conference of Agricultural Engineering AgEng*. [online] <http://www.geyseco.es/geystiona/adjs/comunicaciones/304/C04240001.pdf> - letzter Zugriff am 10.01.2020.
- Morsing, S., Ikeguchi, A., Bennetsen, J., Strøm, J., Ravn, P., und Limi, O. (2002). Wind induced isothermal airflow patterns in a scale model of a naturally ventilated swi-

- ne barn with cathedral ceiling. *Applied Engineering in Agriculture*, 18:97–101. doi: 10.13031/2013.7708.
- Mußlick, M., Krause, K. H., und Sickert, G. (2015). Alternative raumluftechnische Konzepte der Emissionsminderung in der Schweinehaltung unter den Gesichtspunkten des Tier- und Umweltschutzes. [online] http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/alternative_raumluftechnische_konzepte_endfassung_juli_2015.pdf - letzter Zugriff am 15.03.2017.
- NEC-Richtlinie 2001/81/EG (2001). Richtlinie 2001/81/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2001 über nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe.
- 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.
- Norddeutscher Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen (HLRN) (2018). About HLRN. [online] <https://www.hlrn.de/home/view/Organisation/AboutHlrn> - letzter Zugriff am 18.12.2018.
- Norddeutscher Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen (HLRN) (2019). HLRN Accounting. [online] <https://support.hlrn.de/home/view/Service/Accounting> - letzter Zugriff am 06.01.2020.
- Qianying, Y., König, M., Janke, D., Hempel, S., Zhang, G., Amon, B., und Amon, T. (2018). Wind Tunnel Investigations of Sidewall Opening Effects on Indoor Airflows of a Cross-Ventilated Dairy Building. In *Energy & Buildings*. doi: 10.1016/j.enbuild.2018.07.026.
- Rösemann, C., Haenel, H.-D., Dämmgen, U., U., D., Wulf, S., Eurich-Menden, B., Freibauer, A., Döhler, H., Schreiner, C., Osterburg, B., und Fuß, R. (2019). Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 - 2017 : Report zu Methoden und Daten (RMD) Berichterstattung 2019. Technical Report 67, Johann Heinrich von Thünen-Institut. Thünen-Report.
- Sapounas, A. A., Campen, J. B., Smits, M. C. J., und van Dooren, H. J. C. (2009). Simulating the effect of forced pit ventilation on ammonia emission from a naturally ventilated cow house with CFD. [online] <https://edepot.wur.nl/169220> - letzter Zugriff am 10.01.2020.
- STAR-CCM+ (2018a). *Manual. Version 12.06.011*. München, 12.06.011 edition.
- STAR-CCM+ (2018b). Support-Anfrage im Steve-Portal. [online].
- Statistisches Bundesamt (2019). Viehbestand - Fachserie 3 Reihe 4.1 - 3. Mai 2019. [online] <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft->

Forstwirtschaft-Fischerei/Tiere-Tierische-Erzeugung/_inhalt.html#sprg239762 - letzter Zugriff am 25.02.2020.

Stolz, H., Linke, S., und Winter, T. (2014). Ammoniakkonzentrationen in und Ammoniakemissionen aus einer Voliere für Legehennen - ein Beitrag der numerischen Strömungssimulation zur Unterstützung der Messtechnik. In *Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften : Workshop Osnabrück 2014*, pages 65–76. Shaker Verlag.

Suding (2018). Fläbo 55 - 3 to Achslast. [online] <https://suding.de/produkte/spaltenboden-und-mehr-fuer-rinder/spaltenboden-fuer-die-rinder-und-milchviehhaltung/flaebo-55-3-to-achslast> - letzter Zugriff am 17.10.2018.

Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (2016). Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 22. August 2006 (BGBl. I S. 2043), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 14. April 2016 (BGBl. I S. 758) geändert worden ist.

UBA (2014). Ammoniak. [online] <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/ammoniak> - letzter Zugriff am 17.10.2018.

UBA (2019). Ammoniak-Emissionen. [online] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/luftschaedstoff-emissionen-in-deutschland/ammoniak-emissionen> - letzter Zugriff am 25.02.2020.

von Dooren, H. J. C. und Sapounas, A. (2013). Use of computational fluid dynamics (CFD) modelling to improve tracer gas techniques in very open naturally ventilated livestock buildings. Technical Report 664, Wageningen UR Livestock Research. [online] <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/279240> - letzter Zugriff am 10.01.2020.

Wirtschafts- und Sozialrat Wirtschaftskommission für Europa (2014). ECE/EB.AIR/120 Leitfaden zur Vermeidung und Verringerung von Ammoniakemissionen aus landwirtschaftlichen Quellen. Inoffizielle deutschsprachige Version im Auftrag des schweizerischen Bundesamts für Umwelt. [online] https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/fachinfodaten/unece_2012_leitfadenuebertechnikenzurvermeidungundverringervvo.pdf.download.pdf/unece_2012_leitfadenuebertechnikenzurvermeidungundverringervvo.pdf - letzter Zugriff am 07.11.2018.

Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim BMEL (2015). Wege zu einer gesellschaftlich akzeptierten Nutztierhaltung. Kurzfassung des Gutachtens.

Ziehl-Abegg SE (2016a). Ventilatoren für die Landwirtschaft. [online] <https://www.ziehl-abegg.com/de/de/downloads/> - letzter Zugriff am 29.10.2018.

Ziehl-Abegg SE (2016b). Ventilatoren und Regeltechnik für die Landwirtschaft. [online] <https://www.ziehl-abegg.com/de/de/downloads/> - letzter Zugriff am 29.10.2018.

A. Anhang

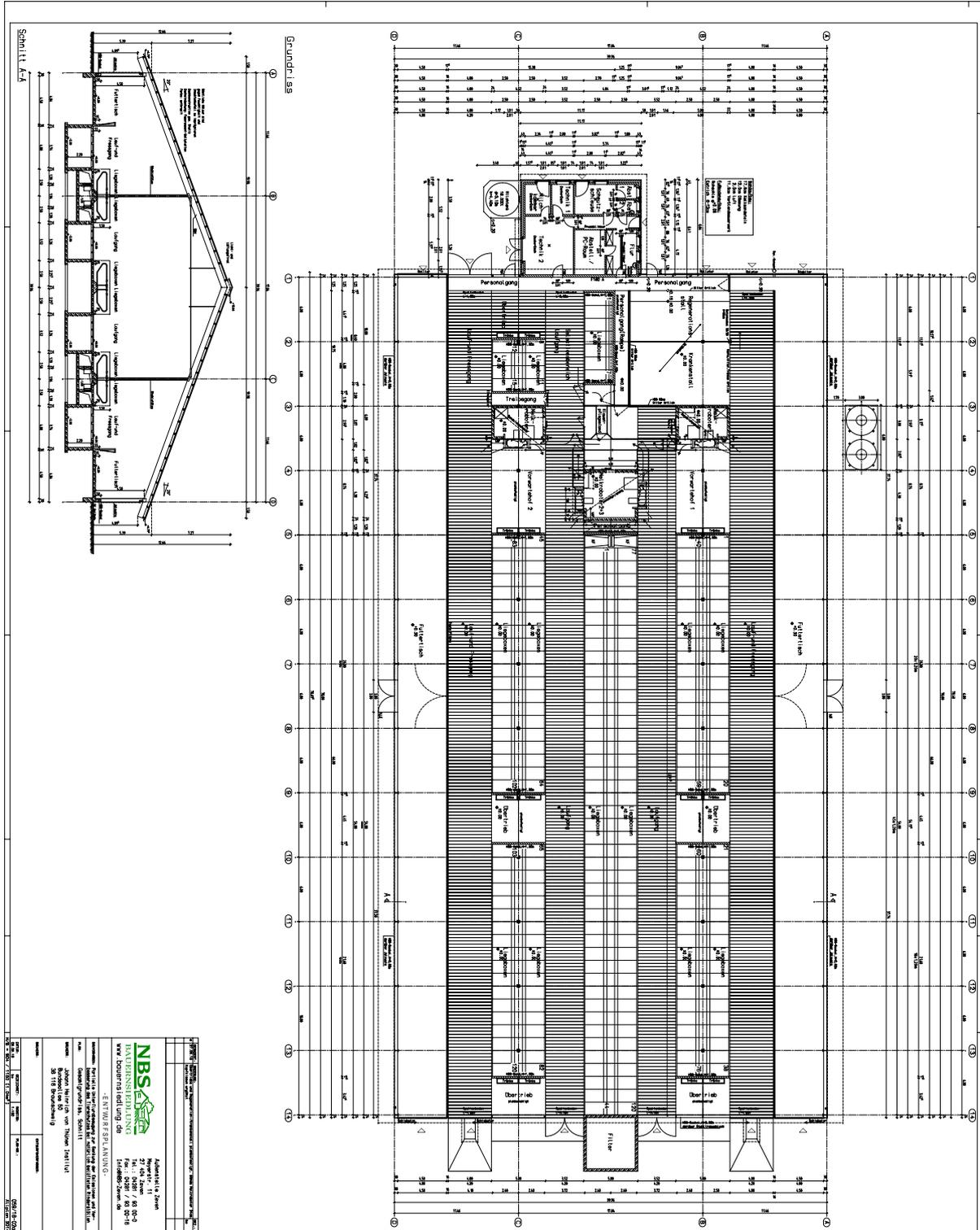


Abb. 53.: Grundriss und Schnitt Stallgebäude Version 01

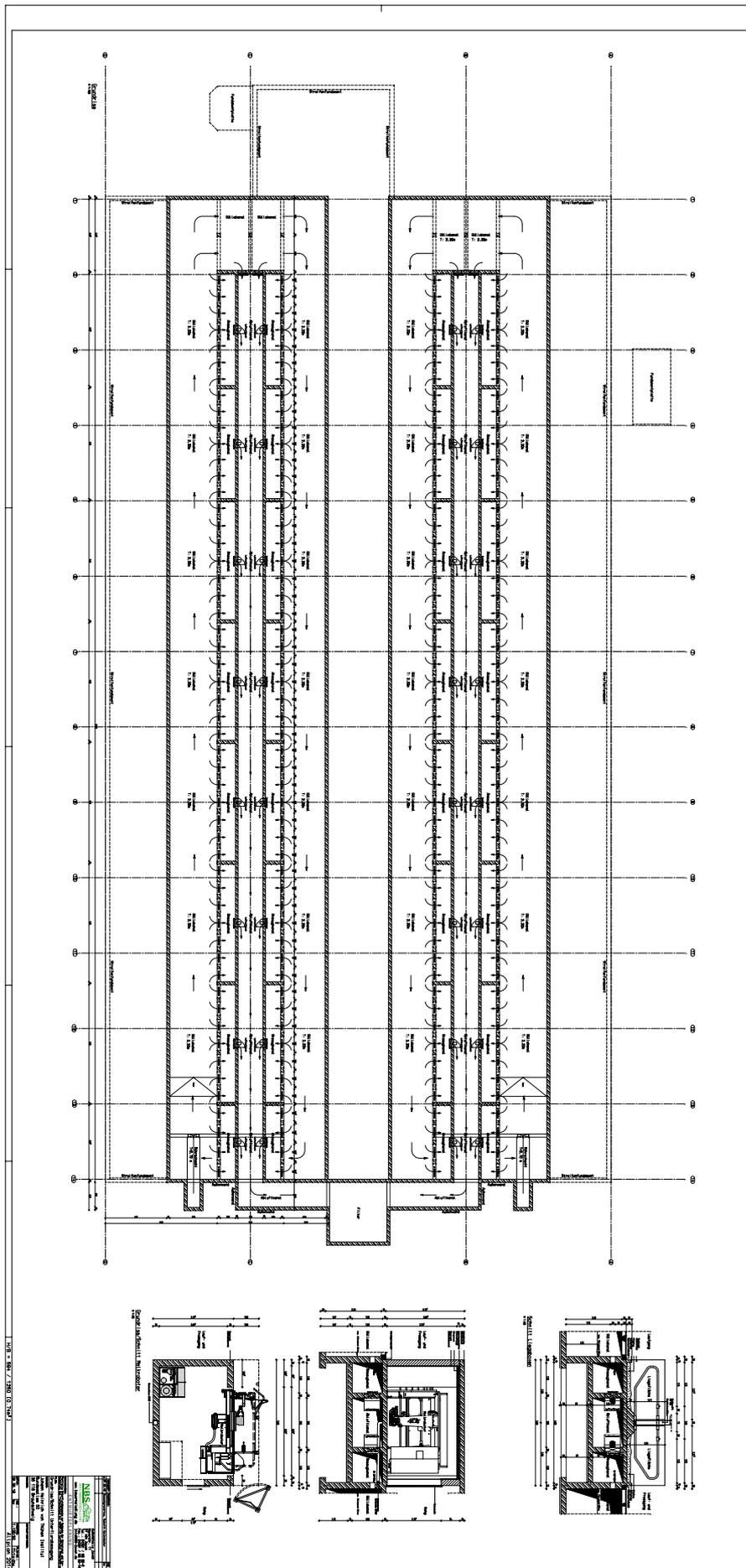


Abb. 54.: Grundriss und Schnitt Unterflurabsaugung Version 01

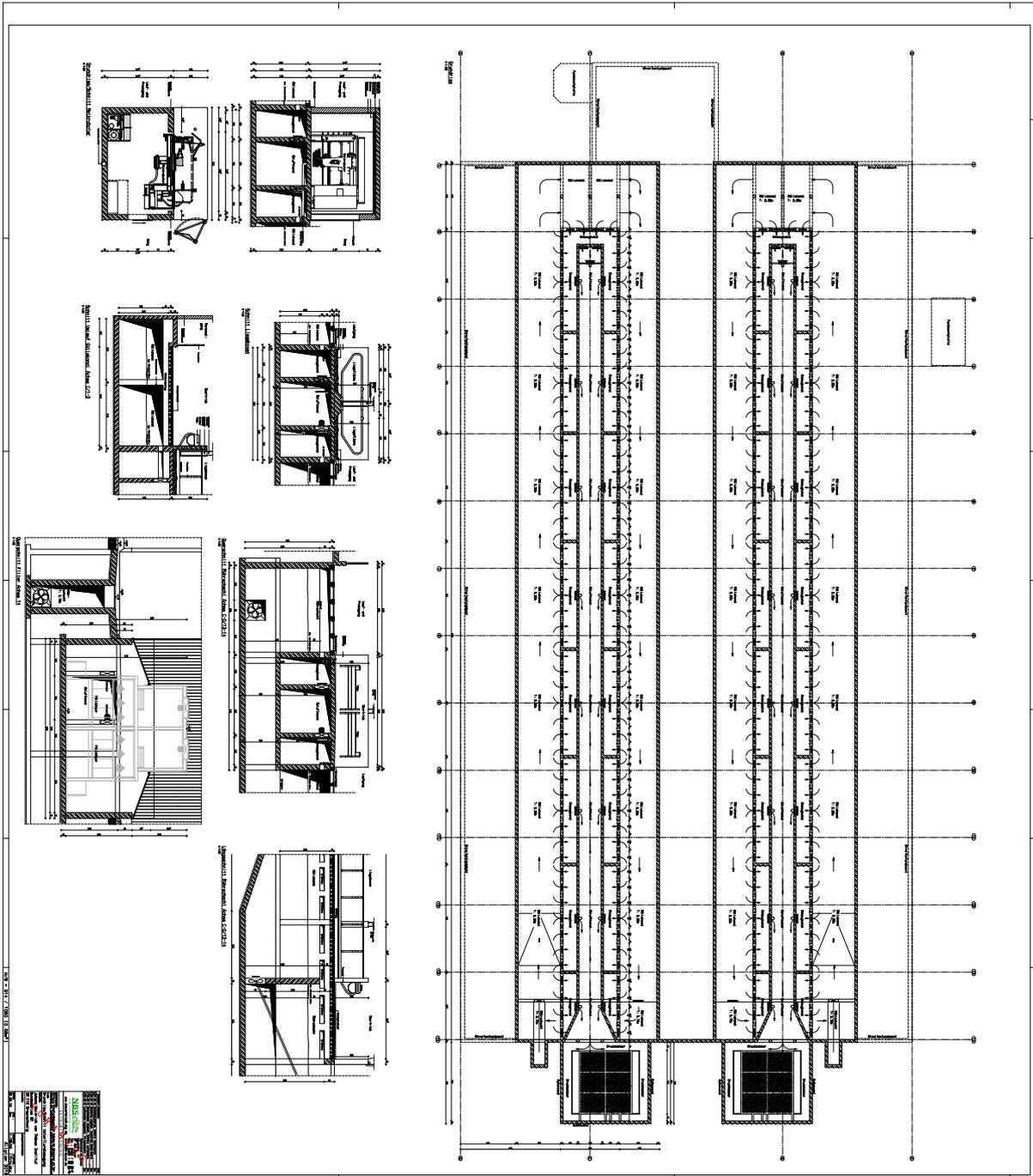


Abb. 56.: Grundriss und Schnitt Unterflurabsaugung Version 08

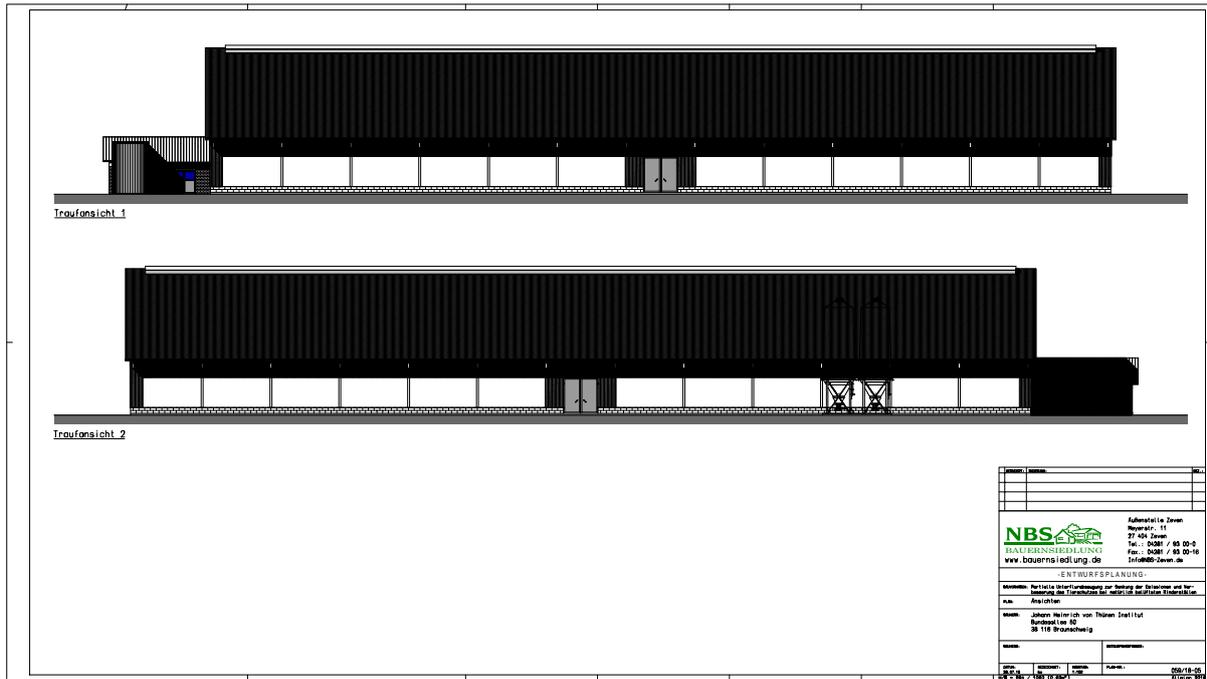


Abb. 57.: Seitenansichten Stallgebäude Version 08

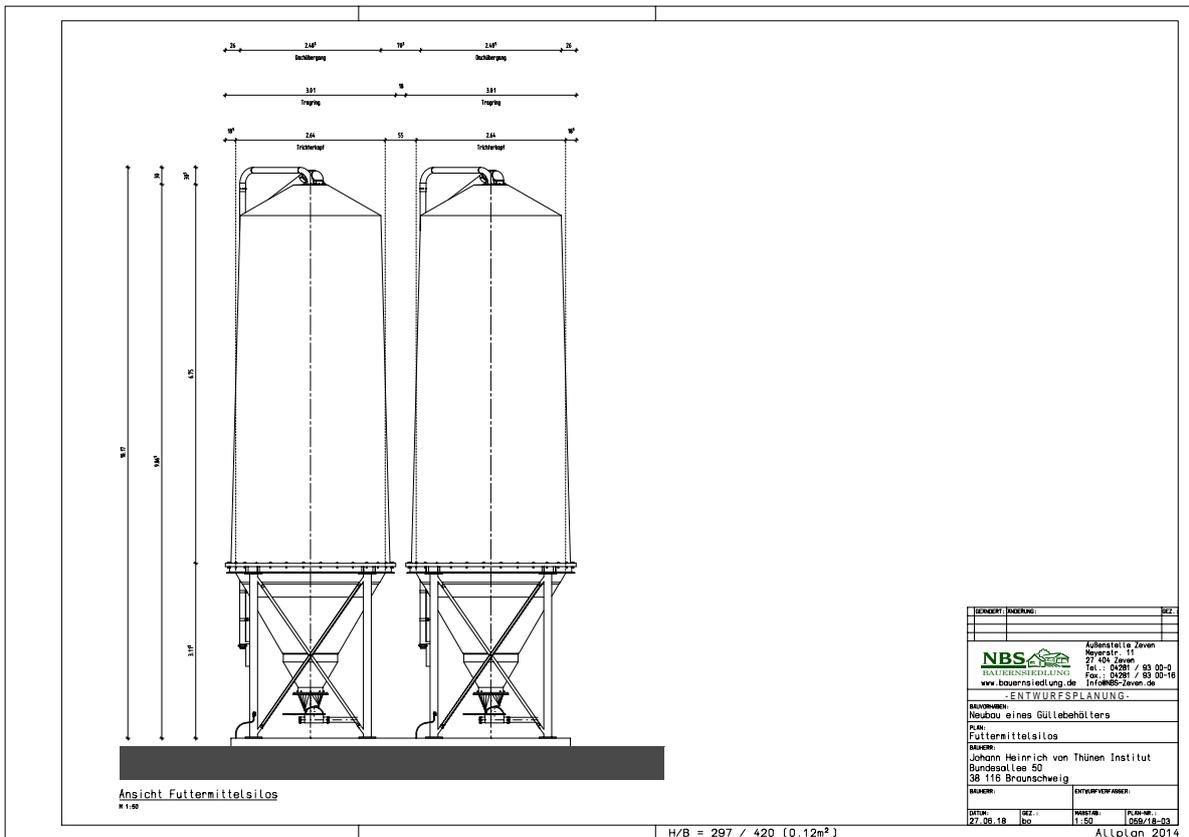


Abb. 58.: Ansicht Futtermittelsilos Version 08

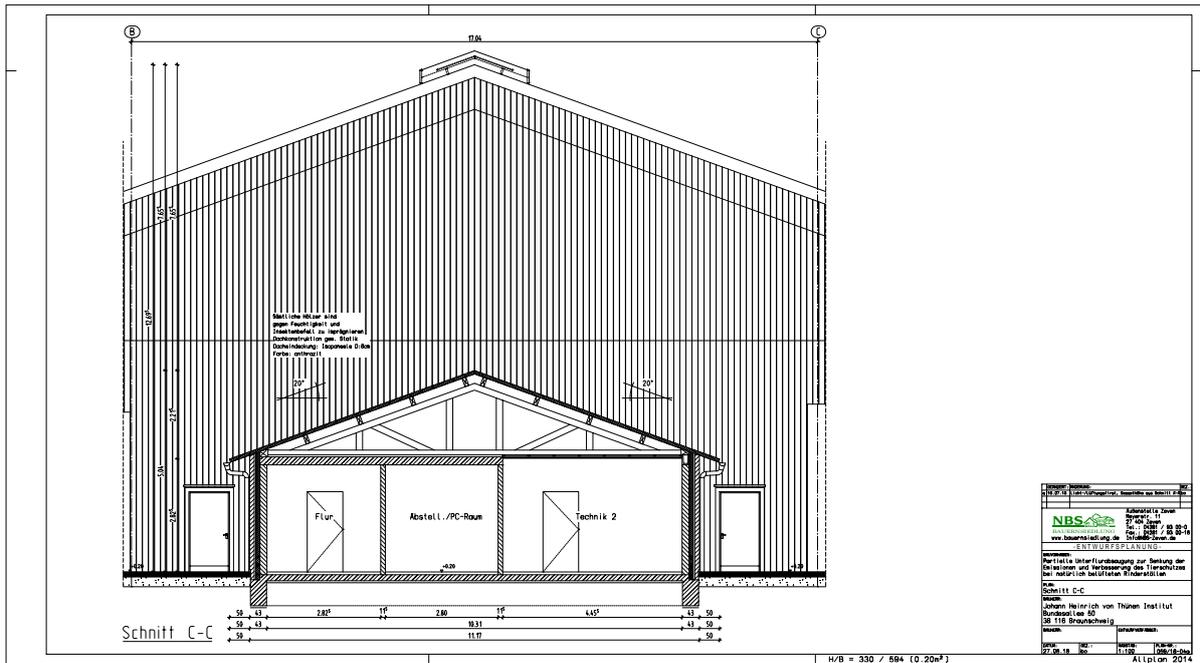


Abb. 59.: Schnitt Technikgebäude Version 08

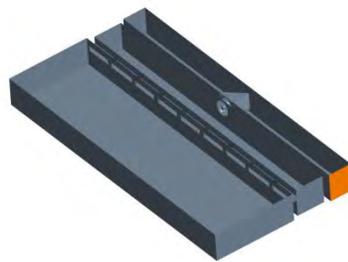


Abb. 60.: Testmodell für Ventilatormodellierung

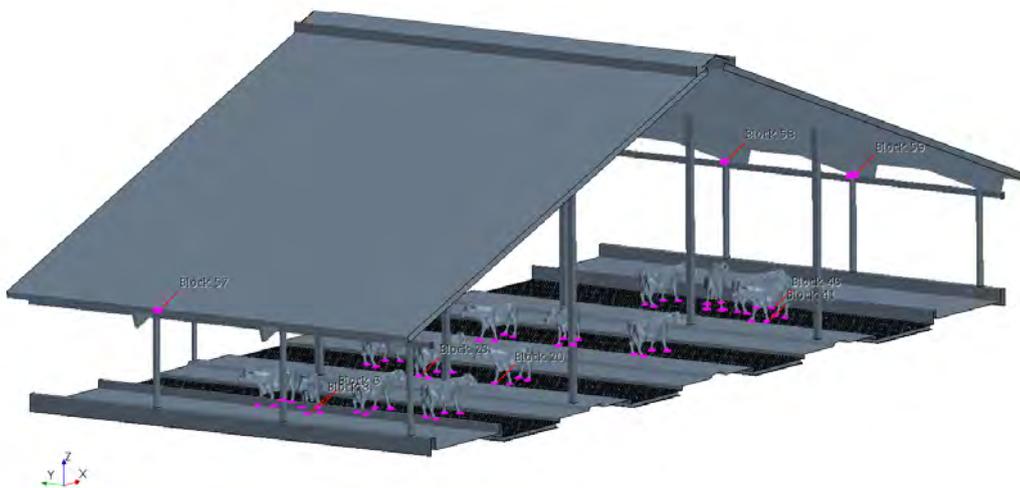


Abb. 61.: Darstellung der Position der Volumetric Controls in der ersten Basisrechnung



Abb. 62.: Box zur Aufbewahrung des INNOVA 1302 mit angehängtem Polytron C300 zur NH_3 -Messung der Stallluft



Abb. 63.: Edelstahlrohr im Unterflurbereich mit integriertem Schlauch zur Messung der NH_3 -Konzentration über der Gülle



Abb. 64.: Messposition der CO_2 -Konzentration in der Luft im Bereich des Kraftfutterautomaten



Abb. 65.: Messposition für Lufttemperatur und -feuchte sowie CO_2 -Konzentration im Außenbereich des Stalles



Entwicklung eines Systems zur Minderung der Ammoniakemissionen aus frei belüfteten Rinderställen

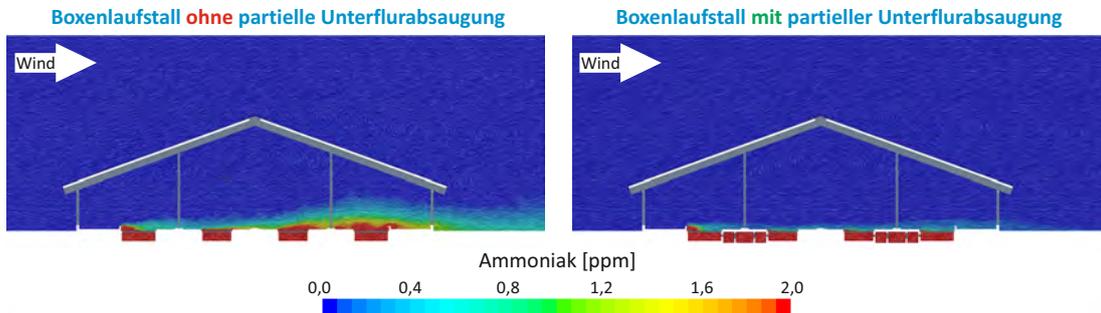
Hintergrund

- Versauerung und Stickstoffanreicherung im Erdreich und in Gewässern können auf Ammoniak zurückgeführt werden
- 95 % der deutschlandweiten Ammoniakemissionen kommen aus der Landwirtschaft und der Großteil davon aus der Tierhaltung
- NERC-Richtlinie der EU zwingt Deutschland zum Handeln
 - Bis 2030 Reduktion der NH₃-Emissionen um 5 % gegenüber dem Stand von 2005
 - Ab 2030 Reduktion der NH₃-Emissionen um 29 % gegenüber dem Stand von 2005

Ziele

- Absaugung der kontaminierten Luft über der Gülle und Zuführung zu einer Reinigungsanlage
- Verhinderung, dass kontaminierte Luft in den Oberflurbereich gelangt
- Senkung der Emission von Ammoniak eines frei belüfteten Rinderstalls
- Erhöhung der gesellschaftlichen Akzeptanz der Tierhaltung durch Steigerung des Tierwohls

Lösungsansatz mit Hilfe der Numerischen Simulation



Verfahren

- Strömungssimulation über RANS-Verfahren
- Turbulenzmodellierung durch Realizable K-Epsilon-Modell und Two-Layer All y+ Wall Treatment
- Simulation verschiedener äußerer klimatischer Bedingungen sowie unterschiedlicher Absaugkonfigurationen

Ergebnisse

- Plausibilisierung auf physikalische Richtigkeit über Residuen, Massenstrombilanzen und Druckverteilungen
- Auswertung der Ammoniak-Volumenströme an den Außengrenzen des Stalles
- Bewertung hinsichtlich Emissionsminderungspotential der Absaugung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten

Die ersten Ergebnisse deuten auf eine starke Minderung der Ammoniak-Emissionen eines frei belüfteten Rinderstalles mit Unterflurabsaugung hin. Die erzielten Werte liegen bei einem Zehntel der Emissionen eines frei belüfteten Rinderstalles ohne Unterflurabsaugung.

Zukünftige Herausforderungen im Bereich der partiellen Unterflurabsaugung im Rinderstall

- Integration des Systems in neue Ställe
- Tests unter realen Bedingungen
- Wartung des Systems im normalen Stallbetrieb
- Regelung des Abluftvolumenstromes in Abhängigkeit der klimatischen Randbedingungen (Wind, Temperatur)
- Entwicklung des Systems als Standard für zukünftige Rinderställe

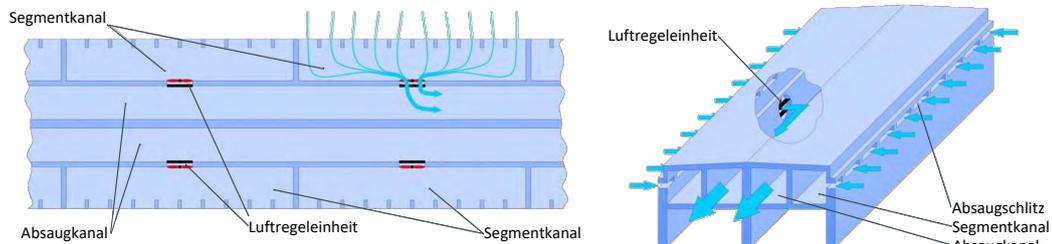
Abb. 66.: Poster von der Eurotier zur Erläuterung des Projektes

Partielle Unterflurabsaugung im Rinderstall



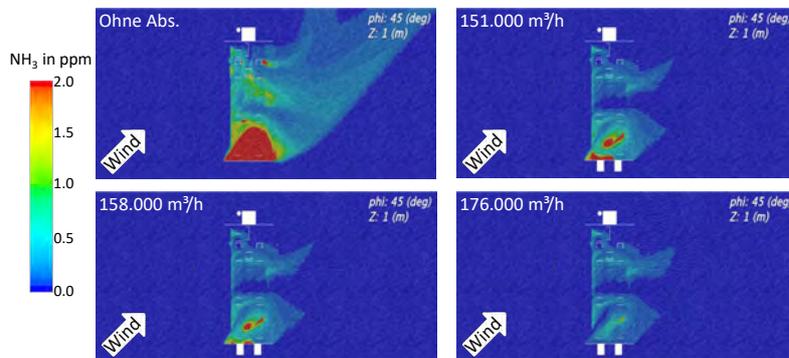
Weiterführende Ergebnisse

Technische Umsetzung der partiellen Unterflurabsaugung im Rinderstall



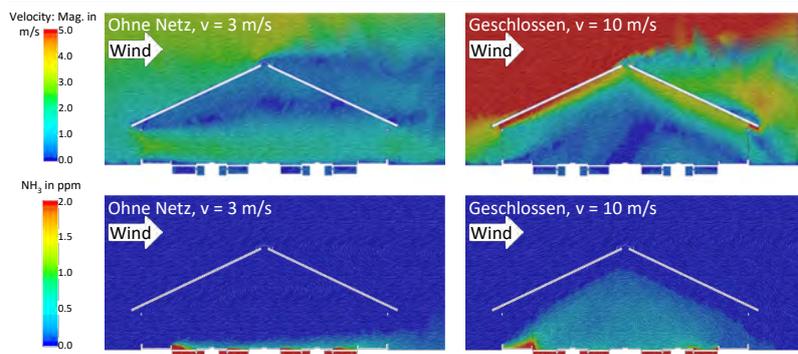
- Absaugung der Luft unterhalb des Spaltenbodens über Liniensenken, damit eine gleichmäßige Strömungsgeschwindigkeit über die gesamte Tiefe des Güllekellers gewährleistet werden kann
- Sammlung der Abluft in einem Segmentkanal
- Zuführung der Luft zum Wäscher über die zentralen Absaugkanäle
- Regelung des individuellen Absaugvolumenstroms pro Segmentkanal über Luftregleinheiten

Schräganströmung, $v = 3 \text{ m/s}$



- Durch die hier dargestellte Schräganströmung von 45° bildet sich ohne Absaugung ein großer Ablösewirbel, in dem das Ammoniak stark aufkonzentriert wird
- Bereits ein moderater Absaugvolumenstrom von $151.000 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Kanal kann den stark durch Ammoniak kontaminierten Bereich deutlich verkleinern
- Eine weitere lokale Steigerung der Ventilator Drehzahlen im vorderen Bereich der Absaugung (direkt unterhalb des Ablösewirbels) kann zu einer stärkeren Reduzierung der Ammoniakbelastung führen

Windschutznetze, Absaugung: $151.000 \text{ m}^3/\text{h}$



- Bei komplett geschlossenen Windschutznetzen fließt ein Teil der Strömung mit hoher Geschwindigkeit durch den noch offenen Querschnitt zwischen den Dachsparren
- Es bildet sich dadurch im Gegensatz zum Strömungsfeld ohne Windschutznetzen im unteren Stallbereich ein Wirbelfeld, das das Ammoniak aus dem Güllekanal saugt
- In einem solchen Fall muss die Regelung die Absaugung weiter hochfahren (dargestellt sind $151.000 \text{ m}^3/\text{h}$), um zu verhindern, dass viel NH_3 in den Stallbereich und die Umwelt gelangt

Weitere angestrebte Untersuchungen

- Untersuchung der Performance der partiellen Unterflurabsaugung bei Windstille (natürliche Konvektion) in einer Sommer- (30°C) und einer Wintersituation (5°C)
- Weiterführende Untersuchung, ob durch die Unterflurabsaugung ein Chill-Effekt erzeugt werden kann, der die Gefahr von Hitzestress senkt
- Untersuchung des Strömungsverhaltens bei ganz und partiell geschlossenen Windschutznetzen und einer zusätzlichen Schließung der Zwischenräume zwischen den Dachsparren
- Untersuchung des Einflusses des Güllefüllstandes auf die Performance der partiellen Unterflurabsaugung



Partner:



Gefördert durch:



Thünen-Institut für Agrartechnologie
Julian Hartje
Bundesallee 47 - 38116 Braunschweig
Mail: julian.hartje@thuenen.de

Abb. 67.: Handout BTU-Tagung Rückseite

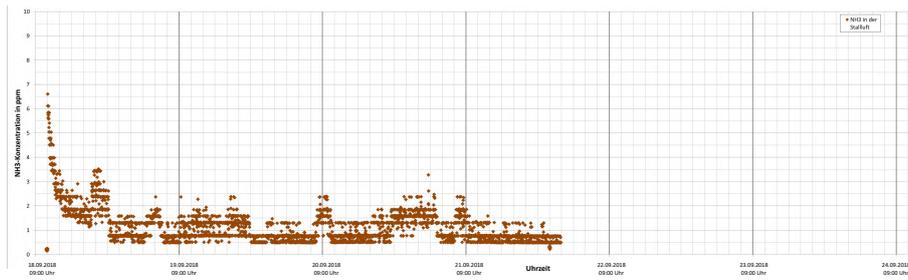


Abb. 68.: Zeitlicher Verlauf der NH_3 -Konzentration in der Stallluft in etwa 3 m Höhe

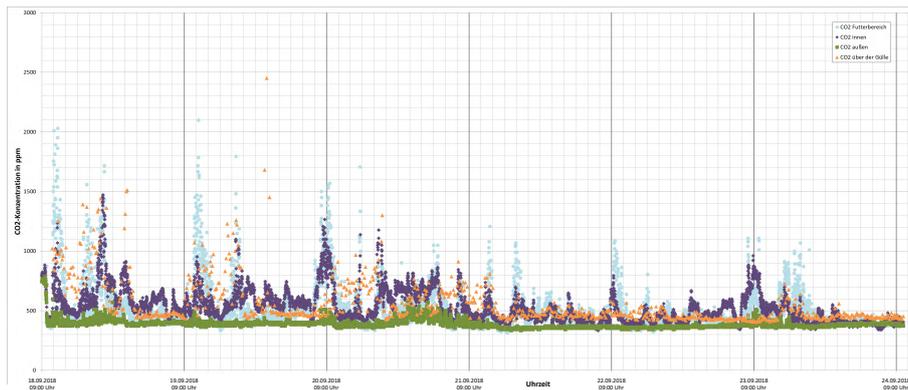


Abb. 69.: Zeitlicher Verlauf der CO_2 -Konzentration innerhalb und außerhalb des Stalles sowie über der Gülle

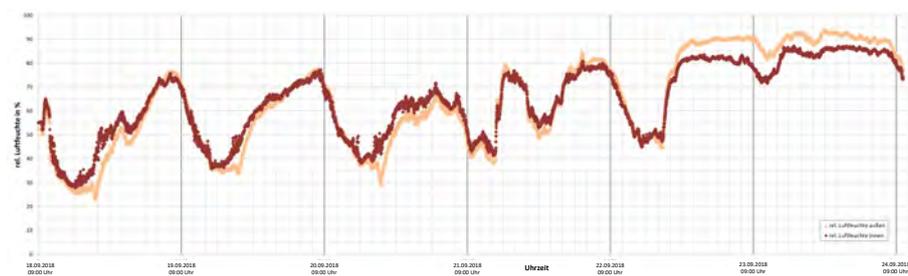


Abb. 70.: Zeitlicher Verlauf der relativen Feuchte innerhalb und außerhalb des Stalles



Abb. 71.: Zeitlicher Verlauf der CH_4 -, N_2O - sowie der Wasserdampfkonzentration über der Gülle

NB Boxenlaufstall Kostenschätzung

Mengen- und Kostenberechnung
Währung EUR



Pos.	Art.	Bezeichnung	Einheit	Menge	Preis	Netto	Brutto
NB Boxenlaufstall Kostenschätzung							2.125.030,00
Erdarbeiten							131.600,00
01	Erdarbeiten Boxenlaufstall						36.200,00
01.	10	Mutterboden aufnehmen	m2	3.700,000	1,00	0,00	3.700,00
01.	20	Erdäushub der Baugrube (Gülle Keller und Melkstandgrube)	m3	4.000,000	4,50	0,00	18.000,00
01.	30	vorrh. Füllmaterial / Bodenaushub einbauen	m3	2.500,000	5,00	0,00	12.500,00
01.	60	Mutterboden anplanieren	m3	1.000,000	2,00	0,00	2.000,00
03	Hofbefestigung / Zuwegung						80.600,00
03.	10	Mutterboden aufnehmen	m2	2.000,000	1,00	0,00	2.000,00
03.	20	Schottertragschicht Betonrecycling	m2	2.000,000	9,50	0,00	19.000,00
03.	30	Hofbefestigung aus Betonpflaster bzw Asphalt TDS	m2	1.000,000	26,00	0,00	26.000,00
03.	40	Betonborde	m	200,000	28,00	0,00	5.600,00
		Untergrund Zuwegung überarbeiten	m2	1.000,000	3,00	0,00	3.000,00
		Asphalt Zuwegung TDS 10 cm	m2	1.000,000	25,00	0,00	25.000,00
04	Entwässerungsleitungen						14.800,00
04.	20	Regenwasserentwässerung DN 150	m	100,000	25,00	0,00	2.500,00
04.	30	Regenwasserentwässerung DN 200	m	100,000	28,00	0,00	2.800,00
04.	50	Regenwasserentwässerung DN 300	m	100,000	40,00	0,00	4.000,00
04.	60	Stahlbetonkontrollschacht	St	2,000	2.375,00	0,00	4.750,00
04.	70	Straßenablauf mit Schlammraum	St	3,000	250,00	0,00	750,00
Mauer und Betonbauarbeiten							772.430,00
06	Baustelleneinrichtung						6.980,00
06.01	Baustelleneinrichtung						6.980,00
06.01.	10	Sicherheits- / Baustelleneinrichtungen	psch	1,000	3.500,00	0,00	3.500,00
06.01.	20	Betonüberwachung	psch	1,000	2.500,00	0,00	2.500,00
06.01.	30	Gebäude einmessen und auswinkeln	psch	1,000	980,00	0,00	980,00
08	Betonbauarbeiten Boxenlaufstall						694.130,00
Leckageerkennungssystem							103.900,00
		Folie d = 1,5 mm mit Drainmatte	m2	3.100,000	25,00	0,00	77.500,00
		Kontrolldrainage	m	360,000	50,00	0,00	18.000,00
		Kontrollschächte	Stk	12,000	250,00	0,00	3.000,00
		Befestigungsschienen	m	360,000	15,00	0,00	5.400,00
08.02	Sauberkeitsschichten						26.800,00
08.02.	10	Feinplanum	m2	3.200,000	1,00	0,00	3.200,00
08.02.	20	Noppenfolie	m2	900,000	2,20	0,00	1.980,00
08.02.	30	PE- Folie,	m2	2.300,000	2,40	0,00	5.520,00
08.02.	40	Beton als Sauberkeitsschicht	m2	2.300,000	7,00	0,00	16.100,00
08.03	Gülle Keller						358.700,00
08.03.	10	Stahlbetonkellersohle, Pos. 33, Gülle Keller	m2	2.380,000	45,00	0,00	107.100,00
08.03.	20	Zulage Gülle Keller	psch.	3,000	750,00	0,00	2.250,00

Abb. 72.: Kostenkalkulation für Stall ohne partielle Unterflurabsaugung, Blatt 1

NB Boxenlaufstall Kostenschätzung
Mauer und Betonbauarbeiten
Mengen- und Kostenberechnung
Währung EUR



Pos. N.	Bezeichnung	Einheit	Menge	Preis	Netto	Brutto
08.03. 20	Fortsetzung Zulage Güllekeller		500,000	120,00	0,00	60.000,00
08.03. 40	Stahlbetonwände Pos. 25, d=30 cm, Güllekeller	m2	500,000	120,00	0,00	60.000,00
08.03. 50	Stahlbetonwände Pos. 25, d=25 cm, Güllekeller	m2	1.550,000	115,00	0,00	178.250,00
08.03. 70	Fugenblech	m	240,000	15,00	0,00	3.600,00
08.03. 80	Zulage Betonkonus	st	3,000	500,00	0,00	1.500,00
08.03. 90	Stahlbetonstürze, Pos. 21/23/31 b x h = 25/30 cm	m	80,000	75,00	0,00	6.000,00
08.04	Streifen und Einzelfundamente					19.000,00
08.04. 10	Streifenfundament Pos. 18	m	200,000	95,00	0,00	19.000,00
08.05	Sohlplatten, Decken und Aufkantung					173.355,00
08.05. 20	Stahlbetonsohlplatte Futtertisch Pos. 17b	m2	711,000	50,00	0,00	35.550,00
	Sohle Lauf-Fressgang (Antritt)	m2	80,000	50,00	0,00	4.000,00
08.05. 40	Stahlbetonkellerdecke Liegeboxen	m2	780,000	120,00	0,00	
	Liegeboxen als Fertigteil	psch	1,000	38.500,00	0,00	38.500,00
08.05. 50	Stahlbetonkellerdecke Strohhall und Roboter	m2	200,000	120,00	0,00	24.000,00
08.05. 60	Zulage geglättete Sohle	m²	720,000	12,00	0,00	8.640,00
08.05. 70	Zulage Rampe	st	1,000	500,00	0,00	500,00
08.05. 80	Betonaufkantung - Schieberkante	m	320,000	35,00	0,00	
08.05. 90	Stahlbetonaufkantung 25/50 cm	m	50,000	75,00	0,00	3.750,00
08.05. 100	Futtertischaufkantung	m	315,000	65,00	0,00	20.475,00
08.05. 110	Einzelsockel	St	22,000	45,00	0,00	990,00
08.05. 130	HBS-Wand d= 17,5 cm, Übertriebe, und Rücktrieb	m2	130,000	75,00	0,00	9.750,00
08.05. 150	Betonstahlmatten	kg	15.000,000	1,20	0,00	18.000,00
08.05. 160	Betonstabstahl	kg	8.000,000	1,15	0,00	9.200,00
08.06	Einbauten					12.375,00
08.06. 10	Rundpfosten einbetonieren	St	100,000	45,00	0,00	4.500,00
08.06. 20	KG-Rohr DN100 -150	m	50,000	35,00	0,00	1.750,00
08.06. 30	Bodenablauf	st	5,000	200,00	0,00	1.000,00
08.06. 40	H.A. Leerrohr, 6 x 15° Wasser /Elt.	st	2,000	250,00	0,00	500,00
08.06. 60	Stielverankerung	st	100,000	35,00	0,00	3.500,00
08.06. 70	L-Winkel als Abschlusskante	m	25,000	45,00	0,00	1.125,00
09	Betonbauarbeiten Nebengebäude					7.475,00
09.01	Nebengebäude					7.475,00
09.01. 10	Streifenfundament Pos. 7	m	35,000	85,00	0,00	2.975,00
09.01. 20	Stahlbetonsohlplatte Nebengebäude	m2	100,000	45,00	0,00	4.500,00
10	Mauerarbeiten					59.595,00
10.01	Mauerwerk					36.995,00
	Verblendmauerwerk	m2	90,000	120,00	0,00	10.800,00
10.01. 30	Kalksandsteinmauerwerk, d= 17,5 cm	m³	270,000	57,00	0,00	15.390,00
10.01. 40	Stahlbetonringbalken Pos. 7 u 14	m	100,000	45,00	0,00	4.500,00
10.01. 50	Stahlbetonstützen, b/d = 24/24 cm, Pos 10	m	50,000	85,00	0,00	4.250,00
10.01. 60	Wischputz	m2	350,000	4,50	0,00	1.575,00

Norddeutsche Bauernsiedlung GmbH, Außenstelle Zeven, Meyerstraße 11, 27404 Zeven
Dipl.-Ing. Henning Fricke, Tel.: 04281 - 930014, Fax: 04281-930016, email: henning.fricke@nbs-zeven.de

Datum: 14.12.2018
Seite: 2

Abb. 73.: Kostenkalkulation für Stall ohne partielle Unterflurabsaugung, Blatt 2

NB Boxenlaufstall Kostenschätzung

Mauer und Betonbauarbeiten

Mengen- und Kostenberechnung

Währung EUR



Pos. Nr.	Bezeichnung	Einheit	Menge	Stk	Stk	Stk	Stk
10.01. 60	Fortsetzung Wischputz		80,000	6,00	0,00		480,00
10.01. 70	Sperrschicht	m2	80,000	6,00	0,00		480,00
10.02	Einbauten						12.400,00
10.02. 10	Innentüren T 30	st	10,000	650,00	0,00		6.500,00
10.02. 20	MEAVARIO Nebeneingangstür 1,01 x 2,26 m	St	2,000	1.200,00	0,00		2.400,00
	Tür 2,50m x2,50m 2 flg.	st	1,000	3.500,00	0,00		3.500,00
10.03	Ausbauarbeiten						10.200,00
10.03. 10	Verbundestrich	m2	160,000	16,00	0,00		2.560,00
10.03. 20	Zulage Gefälleestrich	m2	160,000	2,50	0,00		400,00
10.03. 30	Fussbodenfliesen im Dünnbettverfahren verlegen 15/15	m²	100,000	46,00	0,00		4.600,00
10.03. 40	Bodenfliesen Technik / Büro	m2	60,000	44,00	0,00		2.640,00
11	Stundenlohnarbeiten						4.250,00
11.01	Stundenlohnarbeiten						4.250,00
11.01. 10	Arbeitsstunden Facharbeiter	Std	50,000	45,00	0,00		2.250,00
11.01. 20	Arbeitsstunden Helfer	Std	50,000	40,00	0,00		2.000,00
	Hallenoberbau						345.000,00
	Hallenoberbau Stahlhalle	psch	1,000	345.000,00	0,00		345.000,00
	Melktechnik						600.000,00
	4 Roboter inkl. Technik Tank, Selektion etc. (geschätzt)	psch	1,000	600.000,00	0,00		600.000,00
	Stalleinrichtung						156.200,00
	Liegeboxen	St	255,000	100,00	0,00		25.500,00
	Fressgitter	m	160,000	120,00	0,00		19.200,00
	Gitter Tore abtrennungen	psch	1,000	12.000,00	0,00		12.000,00
	Tränken Wasserleitungen	psch	1,000	20.000,00	0,00		20.000,00
	Curtains	psch	1,000	35.000,00	0,00		35.000,00
	Gülletechnik	st	3,000	6.500,00	0,00		19.500,00
	Fütterungstechnik	psch	1,000	25.000,00	0,00		25.000,00
	Installation						75.000,00
	Elektroinstallaion ohne Erschließung	psch	1,000	50.000,00	0,00		50.000,00
	Wasser und Sanitärinstallation	psch	1,000	25.000,00	0,00		25.000,00
	Spalten						44.800,00
	Spaltenboden 5 to Achslast	m2	1.280,000	35,00	0,00		44.800,00

Abb. 74.: Kostenkalkulation für Stall ohne partielle Unterflurabsaugung, Blatt 3

NB Boxenlaufstall Kostenschätzung 04.2020

Mengen- und Kostenberechnung
Währung EUR



Pos.	Nr. / Spülj.	Beschreibung	Feldart/Anzahl	Dimension	Menge	EP	Zurück %	GP stl
NB Boxenlaufstall Kostenschätzung 04.2020								2.354.016,25
Erdarbeiten								132.340,00
01	Erdarbeiten Boxenlaufstall							36.940,00
01.	10	Mutterboden aufnehmen		m2	3.700,000	1,20	0,00	4.440,00
01.	20	Erdaushub der Baugrube (Gülle Keller und Melkstandgrube)		m3	4.000,000	4,50	0,00	18.000,00
01.	30	vorh. Füllmaterial / Bodenaushub einbauen		m3	2.500,000	5,00	0,00	12.500,00
01.	60	Mutterboden anplanieren		m3	1.000,000	2,00	0,00	2.000,00
03	Hofbefestigung / Zuwegung							80.600,00
03.	10	Mutterboden aufnehmen		m2	2.000,000	1,00	0,00	2.000,00
03.	20	Schottertragschicht Betonrecycling		m2	2.000,000	9,50	0,00	19.000,00
03.	30	Hofbefestigung aus Betonpflaster bzw Asphalt TDS		m2	1.000,000	26,00	0,00	26.000,00
03.	40	Betonborde		m	200,000	28,00	0,00	5.600,00
		Untergrund Zuwegung überarbeiten		m2	1.000,000	3,00	0,00	3.000,00
		Asphalt Zuwegung TDS 10 cm		m2	1.000,000	25,00	0,00	25.000,00
04	Entwässerungsleitungen							14.800,00
04.	20	Regenwasserentwässerung DN 150		m	100,000	25,00	0,00	2.500,00
04.	30	Regenwasserentwässerung DN 200		m	100,000	28,00	0,00	2.800,00
04.	50	Regenwasserentwässerung DN 300		m	100,000	40,00	0,00	4.000,00
04.	60	Stahlbetonkontrollschacht		St	2,000	2.375,00	0,00	4.750,00
04.	70	Straßenablauf mit Schlammraum		St	3,000	250,00	0,00	750,00
Mauer und Betonbauarbeiten								977.176,25
06	Baustelleneinrichtung							8.500,00
06.01	Baustelleneinrichtung							8.500,00
06.01.	10	Sicherheits- / Baustelleneinrichtungen		psch	1,000	3.000,00	0,00	3.000,00
06.01.	20	Betonüberwachung		psch	1,000	4.500,00	0,00	4.500,00
06.01.	30	Gebäude einmessen und auswinkeln		psch	1,000	1.000,00	0,00	1.000,00
08	Betonbauarbeiten Boxenlaufstall							881.492,25
Leckageerkennungssystem								102.950,00
		Folie d = 1,5 mm mit Drainmatte		m2	3.100,000	27,50	0,00	85.250,00
		Kontrolldrainage		m	360,000	15,00	0,00	5.400,00
		Kontrollschächte		Stk	12,000	350,00	0,00	4.200,00
		Befestigungsschienen		m	360,000	22,50	0,00	8.100,00
08.02	Sauberkeitsschichten							31.856,25
08.02.	10	Feinplanum		m2	3.475,000	1,30	0,00	4.517,50
08.02.	20	Noppenfolie		m2	1.225,000	2,75	0,00	3.368,75
08.02.	30	PE- Folie,		m2	2.300,000	2,40	0,00	5.520,00
08.02.	40	Beton als Sauberkeitsschicht		m2	2.250,000	6,80	0,00	15.300,00
07.	30	Folie		m2	2.250,000	1,40	0,00	3.150,00
08.03	Gülle Keller							478.770,00
08.03.	10	Stahlbetonkellersohle, Pos. 33, Gülle Keller		m2	2.250,000	58,50	0,00	131.625,00

Norddeutsche Bauernsiedlung GmbH, Meyerstraße 11, 27404 Zeven
Bautechniker Daniel Kahrs; Tel.: 04281 9300-17; Fax 04281 9300-16; daniel.kahrs@nbs-zeven.de

Datum: 23.04.2020
Seite: 1

Abb. 75.: Kostenkalkulation für Stall mit partieller Unterflurabsaugung, Blatt 1

NB Boxenlaufstall Kostenschätzung 04.2020
Mauer und Betonbauarbeiten

Mengen- und Kostenberechnung
Währung EUR



Pos.-Nr./Spfl.	Beschreibung	Einheit	Dimension	Menge	ET	Zulab %	BP €/t.
08.03. 10	Fortsetzung Stahlbetonkellersohle, Pos. 33, Güllekeller			2,000	1.800,00	0,00	3.600,00
08.03. 20	Zulage Güllekeller	psch.		2,000	1.800,00	0,00	3.600,00
08.03. 40	Stahlbetonwände Außen	m2		1.025,000	135,00	0,00	138.375,00
08.03. 50	Stahlbetonwände innen	m2		1.430,000	115,00	0,00	164.450,00
08.03. 70	Fugenblech	m		700,000	8,20	0,00	5.740,00
	Zulage Aussparung 20/103	St		220,000	75,00	0,00	16.500,00
	Zulage Aussparung Ventilator	St		36,000	100,00	0,00	3.600,00
08.03. 80	Zulage Betonkonus	St		3,000	500,00	0,00	1.500,00
	Zulage Stb.-Decke über Vertiefung	m2		72,000	100,00	0,00	7.200,00
	Stahlbetonstütze	St		6,000	350,00	0,00	2.100,00
08.03. 90	Stahlbetonstütze, Pos. 21/23/31 b x h = 25/30 cm	m		48,000	85,00	0,00	4.080,00
08.04	Streifen und Einzelfundamente						16.450,00
08.04. 10	Streifenfundament 35/80	m		235,000	70,00	0,00	16.450,00
08.05	Sohlplatten, Decken und Aufkantungen						232.441,00
08.05. 20	Stahlbetonsohlplatte Futtertisch	m2		782,000	60,00	0,00	46.920,00
08.05. 60	Zulage geglättete Sohle	m2		782,000	4,50	0,00	3.519,00
	Zulage Futtertischbeschichtung	m2		160,000	32,00	0,00	5.120,00
07. 310	Stahlbetonsohlplatte Liegeflächen	m2		273,000	54,00	0,00	14.742,00
07. 310	Stahlbetonsohlplatte Roboter	m2		120,000	58,00	0,00	6.960,00
07. 310	Stahlbetonsohlplatte Entnahme	m2		50,000	60,00	0,00	3.000,00
08.05. 40	Stahlbetonkellerdecke Liegeboxen	m2		705,000	90,00	0,00	63.450,00
	Liegeboxen als Fertigteil	psch		1,000	38.500,00	0,00	
08.05. 50	Stahlbetonkellerdecke Strohstall	m2		100,000	100,00	0,00	10.000,00
08.05. 50	Stahlbetonkellerdecke Personalgang	m2		40,000	100,00	0,00	4.000,00
08.05. 70	Zulage Rampe	st		1,000	500,00	0,00	500,00
08.05. 80	Betonaufkantung - Liegeboxen	m		310,000	28,00	0,00	8.680,00
08.05. 90	Stahlbetonaufkantung 25/50 cm	m2		80,000	105,00	0,00	8.400,00
08.05. 100	Futtertischaufkantung	m		155,000	55,00	0,00	8.525,00
	Stb.-Stützen	St		2,000	300,00	0,00	600,00
08.05. 130	HBS-Wand d= 17,5 cm, Übertriebe, und Rücktrieb	m2		105,000	105,00	0,00	11.025,00
	Stb.-Sohle Milchtank	psch		1,000	1.500,00	0,00	1.500,00
	Stb.-Sohle Futtersilo	psch		1,000	2.500,00	0,00	2.500,00
08.05. 150	Betonstahlmatten	kg		15.000,000	1,30	0,00	19.500,00
08.05. 160	Betonstabstahl	kg		10.000,000	1,35	0,00	13.500,00
08.06	Einbauten						19.025,00
08.06. 10	Rundpfosten einbetonieren	St		100,000	45,00	0,00	4.500,00
08.06. 20	KG-Rohr DN100 -150	m		50,000	35,00	0,00	1.750,00
08.06. 30	Bodenablauf	st		8,000	200,00	0,00	1.600,00
08.06. 40	H.A. Leerrohr, 6 x 15° Wasser /Elt.	st		2,000	250,00	0,00	500,00
08.06. 60	Stielverankerung	st		100,000	35,00	0,00	3.500,00
08.06. 70	L-Winkel als Abschlusßkante	m		50,000	30,00	0,00	1.500,00

Abb. 76.: Kostenkalkulation für Stall mit partieller Unterflurabsaugung, Blatt 2

NB Boxenlaufstall Kostenschätzung 04.2020

Mauer und Betonbauarbeiten

Mengen- und Kostenberechnung

Währung EUR



Pos.-Nr. / Spill	Beschreibung	Faktor/Auslast.	Einheit	Menge	EP	Zusatz	GP/Fl.
08.06. 70	Fortsetzung L-Winkel als Abschlußkante			600,000	4,00	0,00	2.400,00
07. 730	Fundamenterder		m	600,000	4,00	0,00	2.400,00
07. 740	Anschlußfahnen V4A		St	50,000	25,00	0,00	1.250,00
07. 750	Beton C25/30 liefern und einbauen		m3	15,000	135,00	0,00	2.025,00
09	Betonbauarbeiten Nebengebäude						7.115,00
09.01	Nebengebäude						7.115,00
09.01. 10	Streifenfundament		m	27,000	70,00	0,00	1.890,00
09.01. 20	Stahlbetonsohlplatte Nebengebäude		m2	95,000	55,00	0,00	5.225,00
10	Mauerarbeiten technik/Roboter						75.819,00
10.01	Mauerwerk						47.915,00
	Mauerwerk 2-schalig		m2	90,000	185,00	0,00	16.650,00
10.01. 30	Kalksandsteinmauerwerk, d= 24,0 cm Brandwand		m2	50,000	125,00	0,00	6.250,00
10.01. 30	Kalksandsteinmauerwerk, d= 17,5 cm		m2	145,000	75,00	0,00	10.875,00
10.01. 30	Kalksandsteinmauerwerk, d= 11,5 cm		m2	75,000	60,00	0,00	4.500,00
10.01. 40	Stahlbetonringbalken		psch	1,000	2.500,00	0,00	2.500,00
10.01. 50	Stahlbetonsstützen, b/d = 24/24 cm, Pos 10		m	50,000	90,00	0,00	4.500,00
10.01. 60	Wischputz		m2	300,000	6,80	0,00	2.040,00
10.01. 70	Sperrschicht		m2	80,000	7,50	0,00	600,00
09	Estrich und Fliesenarbeiten						13.954,00
09. 10	Zementestrich		m2	90,000	3,20	0,00	288,00
09. 20	Zulage AKS- Gitter		m2	90,000	7,00	0,00	630,00
09. 30	Liefen und Beimengen von Glasfasern als Fröhschwindrißbewehrung		m2	1,000	0,00	0,00	
09. 40	Wand- und Bodenflächen grundieren		m2	180,000	6,50	0,00	1.170,00
09. 50	Bodenflächen spachteln		m2	90,000	4,50	0,00	405,00
09. 60	Wandflächen spachteln		m2	90,000	5,50	0,00	495,00
09. 70	Wand- und Bodenflächen abdichten		m2	180,000	6,50	0,00	1.170,00
09. 80	Bodenfliesen, Feinsteinzeug, Materialpreis bis 20,00 Euro/m²		m2	90,000	45,00	0,00	4.050,00
09. 90	Sockelfliesen für o. g. Fliesenbelag		m	1,000	18,00	0,00	
09. 100	Wandfliesen, Feinsteinzeug, Materialpreis bis 20,00 Euro/m²		m2	90,000	45,00	0,00	4.050,00
09. 110	Zulage - Anarbeiten an Bodeneinläufe		St	8,000	50,00	0,00	400,00
09. 120	Dauerelastische Abdichtung		m	180,000	7,20	0,00	1.296,00
10.02	Türen/Fenster						13.950,00
10.02. 10	Innentüren T 30		st	8,000	650,00	0,00	5.200,00
10.02. 20	MEAVARIO Nebeneingangstür 1,01 x 2,26 m		St	3,000	1.200,00	0,00	3.600,00
	Tür 2,01m x2,01m 2 flg.		st	1,000	3.350,00	0,00	3.350,00
	Fenster 1,01/1,01		St	2,000	350,00	0,00	700,00
	Fenster 0,76/1,01		St	4,000	275,00	0,00	1.100,00
11	Stundenlohnarbeiten						4.250,00

Abb. 77.: Kostenkalkulation für Stall mit partieller Unterflurabsaugung, Blatt 3

NB Boxenlaufstall Kostenschätzung 04.2020
 Mauer und Betonbauarbeiten
 Mengen- und Kostenberechnung
 Währung EUR



Pos.-Nr. / Spillf.	Beschreibung	Einheit/Ausmaß	Dimension	Menge	EP	ZuAb %	GP netto
11.01	Stundenlohnarbeiten						4.250,00
11.01	Stundenlohnarbeiten						4.250,00
11.01. 10	Arbeitsstunden Facharbeiter		Std	50,000	45,00	0,00	2.250,00
11.01. 20	Arbeitsstunden Helfer		Std	50,000	40,00	0,00	2.000,00
	Hallenoberbau						360.000,00
	Hallenoberbau Stahlhalle		psch	1,000	360.000,00	0,00	360.000,00
	Melktechnik						600.000,00
	4 Roboter inkl. Technik Tank, Selektion etc. (geschätzt)		psch	1,000	600.000,00	0,00	600.000,00
	Stalleinrichtung						156.200,00
	Liegeboxen		St	255,000	100,00	0,00	25.500,00
	Fressgitter		m	160,000	120,00	0,00	19.200,00
	Gitter Tore abtrennungen		psch	1,000	12.000,00	0,00	12.000,00
	Tränken Wasserleitungen		psch	1,000	20.000,00	0,00	20.000,00
	Curtains		psch	1,000	35.000,00	0,00	35.000,00
	Gületechnik		st	3,000	6.500,00	0,00	19.500,00
	Fütterungstechnik		psch	1,000	25.000,00	0,00	25.000,00
	Installation						80.000,00
	Elektroinstallaion ohne Erschließung		psch	1,000	55.000,00	0,00	55.000,00
	Wasser und Sanitärinstallation		psch	1,000	25.000,00	0,00	25.000,00
	Spalten						48.300,00
	Spaltenboden 5 to Achslast		m2	1.150,000	42,00	0,00	48.300,00
					MWST	19,00 %	447.263,09
					GP brutto		2.801.279,34

Abb. 78.: Kostenkalkulation für Stall mit partieller Unterflurabsaugung, Blatt 4