

FORSCHUNGSBERICHT AGRARTECHNIK

des Fachausschusses Forschung und Lehre der
Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG)

526

Joachim Pertagnol

Untersuchung zu verschiedenen Zuluft- führungs- und Kühlmöglichkeiten in Mastschweineeställen

Dissertation

Hohenheim 2013

Universität Hohenheim
Institut für Agrartechnik
Verfahrenstechnik der Tierhaltungssysteme
Prof. Dr. Thomas Jungbluth

Untersuchung zu verschiedenen Zuluffführungs- und Kühlungsmöglichkeiten in Mastschweineeställen

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Agrarwissenschaften

vorgelegt
der Fakultät Agrarwissenschaften

von
M. Sc. Joachim Pertagnol geb. Threm
aus Saarbrücken

2013

Die vorliegende Arbeit wurde am 04.10.2013 von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim als "Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften" angenommen.

Prodekan: Prof. Dr. M. Rodehutscord
Berichterstatter: Prof. Dr. T. Jungbluth
Mitberichterstatter: Prof. Dr. H. Bernhardt
Mündliche Prüfung: Prof. Dr. T. Jungbluth
Prof. Dr. H. Bernhardt
Prof. Dr. V. Stefanski
Leitung des Kolloquium: Prof. Dr.-Ing. S. Böttinger
Tag der mündlichen Prüfung: 23. Oktober 2013

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens „Vergleichende Untersuchung zur Zuluftführung in Schweineställen im Hinblick auf Energieeffizienz, Emissionsgeschehen, Tierwohlbefinden und Wirtschaftlichkeit“ im Auftrag des Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz BMELV (FKZ 28808HSO42; Bewilligungszeitraum November 2009 bis Mai 2013) erstellt. Der Wortlaut der Dissertation entspricht im Wesentlichen den Ausführungen im Schlussbericht des o.g. Vorhabens, der von Herrn Pertagnol (geb. Threm) erstellt wurde. Ihm oblag auch die wissenschaftliche Bearbeitung des Projektes. Der Schlussbericht wurde unter dem Titel „*Vergleichende Untersuchung zur Zuluftführung in Schweineställen im Hinblick auf Energieeffizienz, Emissionsgeschehen, Tierwohlbefinden und Wirtschaftlichkeit*“ und der Autorenschaft der Projektnehmer (J. Threm, E. Gallmann, T. Jungbluth, W. Pflanz, H. Schrade) mit Datum vom 04.06.2013 an den Projektträger Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) zur internen Bearbeitung übermittelt.

Der Inhalt dieser Arbeit darf vervielfältigt, verbreitet und öffentlich aufgeführt werden. Es dürfen Bearbeitungen angefertigt werden unter folgenden Bedingungen: Der Name des Autors muss genannt werden.

© 2013

Im Selbstverlag: Joachim Pertagnol
Bezugsquelle: Universität Hohenheim
Institut für Agrartechnik -440-
Garbenstr. 9
D-70599 Stuttgart

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich recht herzlich bei Herrn Prof. Dr. T. Jungbluth bedanken für die Überlassung des Themas, die wissenschaftlichen und menschlichen Ratschläge, das freie Arbeiten unter hervorragenden Arbeitsbedingungen und die stets offene Tür für Fragen und Anliegen.

Herrn Prof. Dr. H. Bernhardt als Mitberichter danke ich aufrichtig für seine hilfreichen Anregungen und Ratschläge, die mich über meine gesamte universitäre Laufbahn begleitet haben. Herrn Prof. Dr. V. Stefanski gilt mein Dank für die Mitwirkung an der mündlichen Prüfung.

Ein ganz besonderer Dank gilt Frau PD Dr. E. Gallmann, die immer größtes Vertrauen in mich setzte, mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand und mit ihrem geschätzten „kritischen“ Auge zum Gelingen dieser Arbeit beitrug.

Bei Herrn Dr. W. Pflanz als Mitbetreuer des Projektes und als fachliche externe Unterstützung möchte ich mich ebenfalls besonders bedanken sowie bei allen Mitarbeitern der Landesanstalt für Schweinezucht (LSZ) Boxberg. Insbesondere bedanke ich mich bei Herrn H. Schrade für die Ermöglichung der praktischen Umsetzung des Versuchsaufbaus und bei den Mitarbeitern W. Geißler, M. Baierlein und dem Werkstattteam, ohne die der zügige Projektablauf nicht möglich gewesen wäre.

Ein herzliches Dankeschön gilt vor allem auch den Betrieben der Familien Braun, Geywitz und Ziegler für das entgegengebrachte Vertrauen, die investierte Zeit und die nette und freundliche Zusammenarbeit, die ich über den gesamten Projektzeitraum erfahren durfte.

Ebenso danke ich allen Mitarbeitern des VTH-Teams, den ehemaligen und derzeitigen Doktoranden sowie den Mitarbeitern der Landesanstalt für Biogas, von denen ich jederzeit fachliche Unterstützung bekommen habe sowie eine wunderbare Zeit in kollegialer und freundschaftlicher Atmosphäre verbringen konnte. Besonders die fachlichen wie auch freundschaftlichen Gespräche in der Espressorunde sind hier zu erwähnen. An dieser Stelle danke ich auch F. Adrion, der weder vor großen Höhen Angst hatte noch vor physikalischen Formeln zurückschreckte.

Der größte Dank gilt meiner Familie. Zum einen meiner Mutter, die immer an mich geglaubt und mich in meinen Plänen immer unterstützt hat. Zum anderen danke ich meiner Frau, die mich auf den Weg der Agrarwissenschaften brachte und an endlosen Abenden mein Arbeiten durch Korrekturlesen unterstützte.

Meiner Familie gewidmet

Inhaltsverzeichnis

- **Abkürzungen und Symbole**
- **Abbildungsverzeichnis**
- **Tabellenverzeichnis**

1	EINLEITUNG	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	2
2	KENNTNISSTAND	4
2.1	Gesetze	4
2.2	Stallklima	5
2.3	Wirtschaftlichkeit	17
2.4	Zuluftvarianten und Kühlungssysteme	20
2.4.1	Kühlpad	20
2.4.2	Hochdruckbefeuchtung	21
2.4.3	Unterflurzuluft	21
2.4.4	Erdwärmetauscher	22
2.5	Strömungssimulation	23
2.5.1	Tiermodelle in CFD-Simulationen	24
2.5.2	CFD-Simulationen in Ställen	25
3	MATERIAL UND METHODE	27
3.1	Betriebsbeschreibung	27
3.1.1	LSZ-Boxberg	27
3.1.1.1	Tierbesatz und Abteilbeschreibung	30
3.1.1.2	Abluft- und Zuluftführung	33
3.1.1.3	Technische Beschreibung der Kühlsysteme	39
3.1.2	Praxisbetriebe	40
3.1.2.1	Betrieb A (Erdwärmetauscher)	40
3.1.2.2	Betrieb B (Unterflurzulufführung)	42
3.1.2.3	Betrieb C (Hochdruckbefeuchtung)	44
3.2	Untersuchungszeitraum	46
3.3	Messtechnik	48
3.3.1	Messtechnik an der LSZ Boxberg	49
3.3.1.1	Technische Angaben zur Messwerterfassung und Sensoren	49

3.3.1.2	Anordnung der Messplätze	52
3.3.2	Messtechnik an den Praxisbetrieben.....	54
3.4	Überwachung und Kalibration der Messtechnik	56
3.4.1	Boxberg.....	56
3.4.2	Praxisbetriebe	56
3.4.3	Luftvolumenstrombestimmung	57
3.4.3.1	Kalibration und Auswertung der Messventilatoren an der LSZ Boxberg	58
3.4.3.2	Kalibration der Messventilatoren auf den Praxisbetrieben und Auswertung	61
3.4.4	Kalibration des Multigasmonitors.....	64
3.5	Datenerfassung und Aufbereitung.....	67
3.5.1	LSZ Boxberg	67
3.5.2	Praxisbetriebe	68
3.5.3	Emissionsberechnung	68
3.5.4	Wärmebilanzrechnung Abteil	70
3.5.5	Erwärmungsrechnung / Kühlungsrechnung	70
3.5.6	Temperature Humidity Index (THI)	71
3.5.7	Theoretischer Wasserverbrauch	72
3.6	Tierwohlbefinden & Tierdaten	73
3.7	Kostenberechnung / Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	76
3.8	Strömungssimulation.....	81
3.8.1	Software	82
3.8.2	Stallmodelle und Diskretisierung	82
3.8.3	Datengrundlage und Randbedingungen.....	85
3.8.4	Validierung der Simulationsergebnisse	86
4	ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	88
4.1	Wetteraufzeichnungen	88
4.2	Stallklima.....	90
4.2.1	Ergebnisse der Stallklimamessung	90
4.2.1.1	LSZ Boxberg	90
4.2.1.1.1	Zeitraum 2011 – 2012	90
4.2.1.1.2	Werte aus dem Messzeitraum mit einer Außentemperatur größer 22°C....	94
4.2.1.1.3	Heiße Tage	98
4.2.1.1.4	Winter und Übergangsjahreszeit	102

4.2.1.2	Praxisbetriebe	108
4.2.1.2.1	Gesamter Untersuchungszeitraum	108
4.2.1.2.2	Werte aus dem Messzeitraum mit einer Außentemperatur größer 22°C ..	110
4.2.1.2.3	Winter	115
4.2.2	Diskussion der Stallklimaergebnisse.....	117
4.3	Schadgasmessung (CO ₂ , NH ₃ , CH ₄)	120
4.3.1	Ergebnisse der Schadgasmessung	120
4.3.1.1	LSZ Boxberg.....	120
4.3.1.1.1	Emission	120
4.3.1.1.2	Konzentration.....	124
4.3.1.2	Praxisbetriebe	127
4.3.1.2.1	Emission	127
4.3.1.2.2	Konzentration.....	127
4.3.2	Diskussion der Schadgaskonzentration und -emissionen.....	128
4.3.2.1	Schadgaskonzentration	128
4.3.2.2	Schadgasemissionen.....	130
4.4	Produktionsauswertung	133
4.4.1	Ergebnisse der Produktionsauswertung von der LSZ Boxberg.....	133
4.4.2	Diskussion der Produktionsauswertung	134
4.5	Tierwohl	135
4.5.1	Ergebnisse der Tierbeobachtung.....	135
4.5.1.1	Neugier-, Erkundungs- und Beschäftigungsverhalten.....	136
4.5.1.2	Liege- und Stehverhalten	136
4.5.1.3	Atmungsverhalten	136
4.5.1.4	Buchtenverschmutzung	139
4.5.1.5	Integumentbeurteilung	144
4.5.2	Diskussion des Tierwohls	146
4.5.2.1	Atmungsverhalten	146
4.5.2.2	Buchtenverschmutzung	147
4.6	Ressourceneffizienz.....	150
4.6.1	Stromverbrauch	150
4.6.1.1	Stromverbrauch an der LSZ Boxberg	150
4.6.1.2	Stromverbrauch auf den Praxisbetrieben.....	153
4.6.2	Wasserverbrauch.....	154
4.6.3	Wärmeverbrauch	155

4.6.4	Wärmegewinn und Kühlleistung	156
4.6.4.1	LSZ Boxberg	156
4.6.4.2	Praxisbetriebe	157
4.7	Wirtschaftlichkeit	158
4.7.1	Ergebnisse der Wirtschaftlichkeit	158
4.7.2	Diskussion der Energieeffizienz und der Wirtschaftlichkeit	164
4.8	Strömungssimulation	169
4.8.1	Ergebnisse der Strömungssimulation	169
4.8.1.1	Sommer- und Wintersituation im Referenzabteil	169
4.8.1.2	Sommer- und Wintersituation im Unterflurzuluftabteil	170
4.8.2	Diskussion der Strömungssimulationsergebnisse	174
4.8.2.1	Referenzabteil	174
4.8.2.2	Unterflurzuluftabteil	175
4.8.2.3	Verwertbarkeit der Simulationsergebnisse	176
5	ABSCHLUSSDISKUSSION	178
5.1	Bewertung der der eigenen Vorgehensweise	178
5.2	Bewertung und Einordnung der Ergebnisse	182
5.3	Schlussfolgerungen für die praktische Anwendung	186
5.4	Weiterführende Fragestellungen	188
6	ZUSAMMENFASSUNG	190
7	SUMMARY	193
8	LITERATUR	196
9	ANHANG	207

Abkürzungen und Symbole

Symbol	Einheit	Erläuterung
a		Jahr
A _T	[°C]	Außentemperatur
Abb.		Abbildung
Abb. A		Abbildung Anhang
Akh		Arbeitskraftstunde
bzw.		beziehungsweise
ca.		circa
°C		Grad Celsius
CH ₄		Methan
cm		Zentimeter
CO ₂		Kohlendioxid
d		Tag
DIN		Deutsche Industrie Norm
E	[g h ⁻¹]	Emission
EWT		Erdwärmetauscher
FTIR		Fourier Transform InfraRot
g		Gramm
GV	[500 kg LM]	Großvieheinheit
h		Stunde
HDB		Hochdruckbefeuchtung
K		Kelvin
kg		Kilogramm
KTBL		Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
L		Liter
LM	[kg]	Lebensmasse
LSZ		Landesanstalt für Schweinezucht
m		Meter
M	[g mol ⁻¹]	Molare Masse
m ²		Quadratmeter
m ³		Kubikmeter
min		Minute
µm		Mikrometer
NH ₃		Ammoniak
NN		Normal Null
Ø		Durchschnitt
p	[mbar]	Referenzdruck (Normdruck 1013 mbar)
Pa		Pascal
ppm		Part per million

Q	[kWh]	Wärmemenge
R	[J (K mol) ⁻¹]	Molare Gaskonstante 8,314472 J (K mol) ⁻¹
r.F.	[%]	relative Luftfeuchte
R ²		Regressionskoeffizient
rel.		relative
s		Sekunde
T	[°C]	Temperatur
t		Tonne
Tab.		Tabelle
Tab. A		Tabelle Anhang
THI		Temperature Humidity Index
TierSchNutzV		Tierschutz- Nutztierhaltungsverordnung
TZN	[g]	Tageszunahme
U min ⁻¹		Umdrehungen pro Minute
USV		Unterbrechungsfreie Stromver- sorgung
W		Watt
Δ		Delta
ΔT	K	Temperaturdifferenz
	[°C]	Temperatur
	m ³ h ⁻¹	Luftvolumenstrom
	[g kg ⁻¹]	Wassergehalt (absolute Feuchte) der ungesättigten feuchten Luft
Σ		Summe
	[mg m ⁻³]	Massenkonzentration
	[mg m ⁻³]	Massenkonzentration
	[kWh (kg K) ⁻¹]	spezifische Wärme der Luft
	[g h ⁻¹]	durchschnittliche Emission
	[ppm]	Volumenkonzentration

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Bestimmungsfaktoren des Stallklimas (SEUFERT 1986)	5
Abb. 2:	Zone der Temperaturregulation, Körpertemperatur sowie Verschiebung der Anteile von latenter und sensibler Wärmeabgabe an der Gesamtwärmeabgabe in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur (HILLMAN, 1985).....	6
Abb. 3:	Wärmeleistung in kcal / GV·h bei Mastschweinen mit 100 kg Lebendmasse bei unterschiedlichen Temperaturen (ABSHOFF, 1974).....	8
Abb. 4:	Die optimale Umgebung für verschieden schwere Schweine an Hand des hx-Diagrammes (ABSHOFF, 1974).....	9
Abb. 5:	Differenzierung der Zulufteströmsysteme nach ihrer Impuls-bzw. Verdrängungswirkung auf die Raumluft (BÜSCHER, 1991).....	11
Abb. 6:	Hierarchisches Konzept zur Beurteilung der Tiergerechtheit von Haltungssystemen auf betrieblicher Ebene in der landwirtschaftlichen Praxis (SUNDRUM, 1998).....	15
Abb. 7:	Erlöse für Mastschweine seit dem Jahr 2002 (LKV, 2012)	17
Abb. 8:	Anteil der Energieverbrauchsbereiche (verändert nach KTBL 2012).....	18
Abb. 9:	Einfluss des Durchmessers und der Anordnung der Rohre auf die Investitionen eines Erdwärmetauschers für 300 Mastplätze (VAN CAENEGEM & DIDIER, 1998).....	19
Abb. 10:	Anlage der LSZ – Boxberg, rechts im Bild der wärmegeämmte Mastschweinstall.....	28
Abb. 11:	Schematischer Grundriss des Mastschweinstalls und Lüftungswege an der LSZ Boxberg.....	30
Abb. 12:	Verlauf des Abteilgewichtes der jeweiligen Abteile von Okt. 2010 bis Sep. 2012. (HDB= Hochdruckbefeuchtung)	31
Abb. 13:	(oben) Abteil B1 Kühlpad und Abteil C1 Referenz Baugleich Innenausstattung (Mitte) Abteil C2 Hochdruckbefeuchtungsabteil, roter Pfeil zeigt HDB-Leitung (unten) Abteil C3 Unterflurzuluft mit bis zum Ende durchgehendem Versorgungsgang.....	32
Abb. 14:	Volumenstrom und Stromaufnahme bei: 300 bis 1100 U min ⁻¹ , (a) 50 Pa - und (b) 105 Pa Widerstand (NIEDHAMMER, 2000) (---- Volumenstrom - - - - Stromaufnahme)	35
Abb. 15:	Abluftkasten zur Verhinderung eines Lüftungskurzschlusses bei der Unterflurzuluft	35
Abb. 16:	Porendecke im Schachbrettmuster und Heizungsrohre (Deltarohre) zur Erwärmung der einströmenden Luft. (GEIßLER, 2010).....	36
Abb. 17:	Lufführung der Unterflurzuluft: (1) & (2) Zuluftöffnungen, (3) Unterflurkanal von Bauteil A, (4) Abzweigung zum Unterflurkanal des Bauteils C, (5) Einlass unter den Zentralgang des Abteils C3, (6) Lufteinstrom im Winter in das Abteil C3, (7) zusätzliche Zuluftöffnung für Sommerlüftung	38
Abb. 18:	Lufteinstrom im Winter in Abteil C3 (Unterflurzuluft).....	38
Abb. 19:	(oben links) Erdwärmetauscher-Betrieb (oben rechts) Ansaugseite Rippenrohre (unten links) Eingang der Rippenrohre in den Keller des Stalles (unten rechts) Abteil mit vier Buchten, Zuluft durch Spaltenboden des Zentralgangs.....	41
Abb. 20:	Dezentraler Abluftschacht mit an der Unterseite befindlicher Schwerkraftklappe am Betrieb A (Erdwärmetauscher).....	42

Abb. 21:	(links) Abteil mit Unterflurzuluft über Röhren ins Abteil (roter Pfeil) (Mitte) Umbau, Entfernen des geschlossenen Zentralgangbodens (rechts) Unterflurzuluft durch Zentralgang mit Spaltenboden.....	43
Abb. 22:	(rechts) Ansaugen der Frischluft durch das Tor (Mitte) Eingang zum Unterflurkanal (rechts) Unterflurkanal unter Zentralkang mit Temperatur-/Feuchtefühler. Am Ende des Kanals ist der zweite Lufteinlass zu erkennen.....	44
Abb. 23:	(oben) Stall des Praxisbetriebs C (Hochdruckbefeuchtung) (unten links) Abteil mit an der linken und rechten Wand entlanglaufenden Hochdruckbefeuchtungsleitungen + Düsen (unten rechts) Bucht für 36 Tiere mit Breifutterautomat.....	46
Abb. 24:	Schematische Darstellung der Messwerterfassung an der LSZ Boxberg.....	49
Abb. 25:	Lage der Sensoren im Maststall an der LSZ Boxberg.....	53
Abb. 26:	Messsensoren im Schutzkäfig.....	54
Abb. 27:	Skizze mit Bemaßung und Ablichtung des eingebauten Kalibrationsventilators.....	57
Abb. 28:	Messprotokoll der Firma Ziehl-Abegg (KOBBER, 2012).....	58
Abb. 29:	Aufbau zur Kalibration des Messventilators an der LSZ Boxberg.....	59
Abb. 30:	Kalibrationsgeraden der Messventilatoren der Abteile B1 (Kühlpad), C1 (Referenzabteil), C2 (Hochdruckbefeuchtung) und C3 (Unterflurzuluft).	60
Abb. 31:	Von oben eingebauter Messventilator.....	62
Abb. 32:	Kalibration der Messventilatoren auf den Praxisbetrieben. (oben links) Betrieb A Erdwärmetauscher; (oben rechts) Betrieb B Unterflurzuluft; (unten) Betrieb C Hochdruckbefeuchtung.....	63
Abb. 33:	Vergleichsmessungen der Konzentration von CO ₂ (oben), NH ₃ (Mitte) und CH ₄ (unten) in der Stallluft zwischen FTIR, Multigasmonitor von der LSZ Boxberg und Multigasmonitor von der Uni Hohenheim.	66
Abb. 34:	Buchteneinteilung und -beschriftung am Beispiel eines Mastabteils der LSZ Boxberg.....	75
Abb. 35:	Bonitierte Körperregionen des Schweins im Rahmen der Integumentbeurteilung (verändert nach PFLANZ, 2007).....	76
Abb. 36:	Indexberichte der Verbraucherpreise von den Jahren 2000 bis 2013 für: Strom (oben); Erdgas unten (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2013).....	80
Abb. 37:	Modell des Abteils mit Unterflurzuluft (oben) und des Abteils mit Porendeckenzuluft (unten) (ADRION, 2013).....	84
Abb. 38:	Ausschnitt des Raumgitters im Modell des Unterflurzuluftabteils (ADRION, 2013).	85
Abb. 39:	Temperaturverlauf des Außenfühlers am Maststall der LSZ Boxberg.	89
Abb. 40:	Anzahl der Stunden, in denen eine bestimmte Temperatur vorherrschte. Messzeitraum 01.11.2010 - 30.09.2012 (entspricht 16776 Stunden, Abstufung der Außentemperatur 0,1 K).	90
Abb. 41:	Tagesdurchschnittstemperaturen jeweils in den vier Mastschweineabteilen. Links: Jahr 2011 Jan. – Dez. n >200 d , rechts: Jahr 2012 Jan. – Sep. n >175 d. (HDB = Hochdruckbefeuchtung).....	91
Abb. 42:	Tagesdurchschnittswerte der relativen Luftfeuchtigkeit. Links: Jahr 2011 Jan. – Dez. n >200 d , rechts: Jahr 2012 Jan. – Sep. n >175 d. (HDB = Hochdruckbefeuchtung).....	92

Abb. 43:	Tagesdurchschnittswerte des Luftvolumenstroms. Links: Jahr 2011 Jan. – Dez. n >200 d , rechts: Jahr 2012 Jan. – Sep. n >175 d. (HDB = Hochdruckbefeuchtung, 125 Tiere je Abteil).....	93
Abb. 44:	Tagesdurchschnittswerte für Luftgeschwindigkeit im Tierbereich (75 cm Höhe). Links: Jahr 2011 Jan. – Dez. n >200 d , rechts: Jahr 2012 Jan. – Sep. n >175 d. (HDB = Hochdruckbefeuchtung)	93
Abb. 45:	Tagesmittelwerte des Differenzdrucks im Abteil. Links: Jahr 2011 Jan. – Dez. n >200 d , rechts: Jahr 2012 Jan. – Sep. n >175 d. (HDB = Hochdruckbefeuchtung).....	94
Abb. 46:	Temperaturwerte im Abteil bei einer Außentemperatur >22°C. Links: Jahr 2011 Jan. – Dez. (n >652 h), rechts: Jahr 2012 Jan. – Sep. (n >700 h). (HDB = Hochdruckbefeuchtung).....	95
Abb. 47:	Messwerte der relativen Luftfeuchtwerte im Abteil bei einer Außentemperatur >22°C. Links: Jahr 2011 Jan. – Dez. (n >652 h), rechts: Jahr 2012 Jan. – Sep. (n >700 h). (HDB = Hochdruckbefeuchtung)	96
Abb. 48:	Luftvolumenstrom pro Abteil bei einer Außentemperatur >22°C. Links: Jahr 2011 Jan. – Dez. (n >652 h), rechts: Jahr 2012 Jan. – Sep. (n >700 h). (HDB = Hochdruckbefeuchtung).....	96
Abb. 49:	Differenzdruckwerte im Abteil bei einer Außentemperatur >22°C. Links: Jahr 2011 Jan. – Dez. (n >652 h), rechts: Jahr 2012 Jan. – Sep. (n >700 h). (HDB = Hochdruckbefeuchtung).....	97
Abb. 50:	Übersicht über den wärmsten Zeitraum von 2011 & 2012 mit Angabe der Tieranzahl und dem Durchschnittsgewicht. Links: Jahr 2011, rechts: Jahr 2012.....	99
Abb. 51:	Relative Luftfeuchtwerte über die zwei wärmsten Zeiträume. Links: 18.08. – 26.08.2011 n >25000; rechts: 17.08. – 21.08.2012 n >14000.....	100
Abb. 52:	Messwerte des Luftvolumenstroms über die zwei wärmsten Zeiträume. Links: 18.08. – 26.08.2011 n >25000; rechts: 17.08. – 21.08.2012 n >14000.....	101
Abb. 53:	Werte der Differenzdruckmessungen über die zwei wärmsten Zeiträume. Links: 18.08. – 26.08.2011 n >25000; rechts: 17.08. – 21.08.2012 n >14000.....	101
Abb. 54:	Abteilterperaturwerte bei einer Außentemperatur kleiner 10 Grad Celsius im Jahr 2012. (n > 16000).....	103
Abb. 55:	Skizze der Zuluftwege der Unterflurlüftung zum Abteil und die jeweiligen Messpunkte 1 bis 5 im Winter (Grundriss des Maststalles, LSZ Boxberg).....	104
Abb. 56:	Beide Temperaturfühler im Abteil der Unterflurlüftung. Der Fühler links im Bild (Punkt (4)) zeichnet die Temperatur der Frischluft auf, wenn sie über die Buchtentrennwand zu den Tieren steigt. Der Fühler am Trog (Punkt (5)) zeichnet die Abteilterperatur auf.....	104
Abb. 57:	Vergleich der Erwärmung der Zuluft vor dem Eintritt in das Referenz- bzw. Unterflurzulftabteil. Temperaturmesswerte von 10 Tagen im Februar 2012.	105
Abb. 58:	Relative Luftfeuchte im Abteil bei einer Außentemperatur kleiner 10 Grad Celsius im Jahr 2012. (n >16000 → 134 h)	106
Abb. 59:	Werte des Luftvolumenstroms der Abteile bei einer Außentemperatur kleiner 10 Grad Celsius im Jahr 2012. (HDB= Hochdruckbefeuchtung; n >16000 → 134 h)	107
Abb. 60:	Differenzdruckwerte im Abteil bei einer Außentemperatur kleiner 10 Grad Celsius im Jahr 2012. (HDB= Hochdruckbefeuchtung; n >16000 → 134 h).....	108

Abb. 61:	Verlauf der Temperaturwerte über den Untersuchungszeitraum auf den jeweiligen Praxisbetrieben. Links oben: Betrieb A (Erdwärmetauscher), rechts oben: Betrieb B (Unterflurzuluft), unten: Betrieb C (Hochdruckbefeuchtung)	109
Abb. 62:	Relative Luftfeuchtwerte im Abteil bei Betrieb C (Hochdruckbefeuchtung). Abteilpunkt I = erstes Drittel Nordseite des Abteil, Abteilpunkt II Ende zweites Drittel Südseite des Abteils. Links einmal der gesamte Untersuchungszeitraum 01.01.2012 - 09.08.2012 und rechts der Zeitraum bei einer Außentemperatur >22°C. (links: n > 500000; rechts: n >180000).....	110
Abb. 63:	Temperaturmesswerte des Betriebes A (Erdwärmetauscher) bei einer Außentemperatur >22°C. (n >117000).....	111
Abb. 64:	Temperaturmesswerte bei einer Außentemperatur >22°C bei dem Betrieb B (Unterflurzuluftführung).....	112
Abb. 65:	Temperaturmesswerte bei einer Außentemperatur von >22°C am Betrieb C (Hochdruckbefeuchtung). (n >180000)	113
Abb. 66:	Luftvolumenstromwerte je Tierplatz von den Betrieben A (Erdwärmetauscher), B (Unterflur) und C (Hochdruckbefeuchtung) bei einer Außentemperatur von >22°C. (n >74000)	114
Abb. 67:	Differenzdruckmessung der Betriebe A (Erdwärmetauscher), B (Unterflur) und C (Hochdruckbefeuchtung) bei einer Außentemperatur >22°C. (n >74000)	115
Abb. 68:	Temperaturmesswerte aus dem Zeitraum 14.09.2011 bis 17.09.2012 bei einer Außenluft kleiner 10°C (3383 h) am Betrieb A (Erdwärmetauscher).	116
Abb. 69:	Differenzdruckwerte im Kellerraum und im Abteil des Betriebs A (Erdwärmetauscher) bei einer Außentemperatur <10°C. (n >405000)	117
Abb. 70:	Tagesdurchschnittliche Messwerte der Schadgaskonzentrationen im Abteil der Unterflurlüftung über das Jahr 2012.....	126
Abb. 71:	Tageszunahme (TZN) im Vergleich zur Abteiltemperatur der jeweiligen Mastdurchgänge. Dabei sind die Mastdurchgänge zwischen den Abteilen zeitlich versetzt. (oben links) Kühlpad, (oben rechts) Referenz, (unten links) Hochdruckbefeuchtung erstes Boxplot fehlt wegen zu geringen Datensatz, (unten rechts) Unterflur, n >2500 h.....	134
Abb. 72:	Anteil hechelnder und hustender Tiere im Überblick über die Abteile B1 (Kühlpad), Abteil C1 (Referenz), Abteil C2 (Hochdruckbefeuchtung) und Abteil C3 (Unterflur). Zusammengefasst über alle 12 Beobachtungstage.	137
Abb. 73:	Prozentuale Anzahl der hechelnden und hustenden Tiere im Untersuchungszeitraum Mai 2011 bis August 2011 im Abteil C3 (Unterflur).	138
Abb. 74:	Atmungsverhalten der Tiere des zweiten Versuchszeitraumes (2012). Versuchsabteile in Boxberg (linker Teil) und Praxisbetriebe (rechter Teil) (HDB= Hochdruckbefeuchtung).....	139
Abb. 75:	Ø Buchtenverschmutzung (Bereiche 1 bis 9) über alle Beobachtungen in Abteil B1 (Kühlpad). Zusammenfassung des ersten Versuchszeitraums (12 Beobachtungstage 2011).....	140
Abb. 76:	Ø Buchtenverschmutzung (Bereiche 1 bis 9) über alle Beobachtungen in Abteil C1 (Referenz). Zusammenfassung des ersten Versuchszeitraums (12 Beobachtungstage 2011).....	141
Abb. 77:	Buchtenverschmutzung innerhalb des Abteils B1 (Kühlpad) im ersten Versuchszeitraum (12 Beobachtungstage 2011).	142

Abb. 78:	Ø Buchtenverschmutzung (Bereiche 1 bis 9) über alle Beobachtungen in Abteil B1 (Kühlpad). Zusammenfassung des zweiten Versuchszeitraums (20 Beobachtungstage 2012).....	143
Abb. 79:	Ø Buchtenverschmutzung (Bereiche 1 bis 9) über alle Beobachtungen in Abteil C1 (Referenz). Zusammenfassung des zweiten Versuchszeitraums (16 Beobachtungstage 2012).....	143
Abb. 80:	Entwicklung der Buchtenverschmutzung innerhalb des Abteils B1 (Kühlpad) im zweiten Versuchszeitraum (21 Beobachtungstage 2012).....	145
Abb. 81:	Monatlicher Stromverbrauchs der Ventilatoren über die Jahre 2011 und 2012. (HDB= Hochdruckbefeuchtung)	151
Abb. 82:	Darstellung des Stromverbrauchs pro Stunde der Ventilatoren (links) und des Volumenstroms pro Stunde (rechts) vom 19. August 2012. (Ø 27,4°C Außentemperatur) (HDB= Hochdruckbefeuchtung).....	152
Abb. 83:	Vergleich des Stromverbrauchs der Ventilatoren bei 100% Lüfterleistung für eine Stunde mit dem Bezug auf den Tierplatz und als weiterer Vergleich der Stromverbrauch bei 100% Lüfterleistung für die Förderung von 100 m ³ Luft von den Praxisbetrieben Erdwärmetauscher (EWT), Unterflurzuluft und Hochdruckbefeuchtung (HDB).	153
Abb. 84:	Vergleich des Stromverbrauchs, des Luftvolumenstroms und des herrschenden Ø Unterdruckes im Abteil bei 100% Lüfterleistung für eine Stunde zwischen von den Praxisbetrieben Erdwärmetauscher (EWT), Unterflurzuluft und Hochdruckbefeuchtung (HDB).	154
Abb. 85:	Strömungsgeschwindigkeit im Längsschnitt (Mitte der Buchten) des Referenzabteils, Sommersituation (Vektoren 15-fach verlängert).....	169
Abb. 86:	Strömungsgeschwindigkeit im Längsschnitt (Mitte der Buchten) des Referenzabteils, Wintersituation (Vektoren 15-fach verlängert).....	170
Abb. 87:	Lufttemperatur im Längsschnitt (Mitte der Buchten) des Referenzabteils, Wintersituation.....	170
Abb. 88:	Stromlinien und Lufttemperatur im Unterflurzuluftabteil (Modell mit Güllerohr im Unterflurkanal), Sommersituation.....	171
Abb. 89:	Lufttemperatur im Längsschnitt (Mitte der Buchten) des Unterflurzuluftabteils (Modell mit Güllerohr im Unterflurkanal), Sommersituation	172
Abb. 90:	Stromlinien und Lufttemperatur im Unterflurzuluftabteil (Modell ohne Güllerohr im Unterflurkanal), Sommersituation.....	173
Abb. 91:	Stromlinien und Lufttemperatur in der Vorderansicht des Unterflurzuluftabteils (Ansicht von vorne auf Bucht 1), Wintersituation.....	174
Abb. 92:	Nebelprobe im Unterflurzuluftabteil, Wintersituation.....	176

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Grenzwerte von Schadgaskonzentrationen im Aufenthaltsbereich der Schweine. (Verändert nach § 26 (3) 1. TierSchNutzV, 2009).....	4
Tab. 2:	Mindestanforderung an eine uneingeschränkt nutzbare Bodenfläche für Mastschweine (verändert nach § 29 (2) 2. TierSchNutzV, 2009).....	5
Tab. 3:	Planungsdaten Luftvolumenstrom je Einzeltier für die Sommer- und Wintersituation (DIN 18910, 2004) (Bsp. An einem 40 x14 m großen Vollspaltenbodenstall mit 70 kg schweren Mastschweinen.).....	10
Tab. 4:	Beispiele zur Reduktion der NH ₃ - und CH ₄ Emissionen in der Mastschweinehaltung mit Zwangslüftung (Quelle in Anlehnung an GALLMANN, 2003).....	13
Tab. 5:	Wetterdaten der Wetterstation Boxberg (LTZ AUGUSTENBERG, 2013).....	28
Tab. 6:	Abteilbeschreibung zu Tierzahl und Lüftungssystem	33
Tab. 7:	Klimasteuerung an der LSZ Boxberg für die konventionelle Haltung Mast (30 – 120 kg) nach Geißler.....	34
Tab. 8:	Jahreswerte der Wetterstation "Renzen-Pfedelb." (LTZ AUGUSTENBERG, 2013) ..	40
Tab. 9:	Jahreswerte der Wetterstation "Bremelau". (LTZ AUGUSTENBERG,2013)	44
Tab. 10:	Messzeitraum (Betrieb A = Erdwärmetauscher; Betrieb B = Unterflurzuluft; Betrieb C = Hochdruckbefeuchtung).....	47
Tab. 11:	Anzahl der Messtage und davon die Anzahl von Tagen mit plausiblen Messwerten im Untersuchungszeitraum für die drei Messwerterfassungssysteme. (HDB = Hochdruckbefeuchtung; EWT = Erdwärmetauscher)	48
Tab. 12:	Sensoren der Messwerterfassung der Firma Ahlborn.....	50
Tab. 13:	An die Messwerterfassung der Firma Wago angeschlossenen Messsensoren.....	51
Tab. 14:	Ausgewählte technische Daten und Kennwerte des Multigasmonitors 1412 (LUMASENSE TECHNOLOGIES A/S, 2007)	51
Tab. 15:	Übersicht über die Kreuzinterferenzen der mit dem Multigasmonitor 1412 gemessenen Gase. (LUMASENSE TECHNOLOGIES A/S, 2009).....	52
Tab. 16:	Anzahl und Art der Sensoren auf den drei Praxisbetrieben. (Betrieb A = Erdwärmetauscher; Betrieb B = Unterflurzuluft; Betrieb C = Hochdruckbefeuchtung)	55
Tab. 17:	Durchmesser der Abluftkamine der Praxisbetriebe und die Kalibrationsgeraden der Messventilatoren.	64
Tab. 18:	Kriterien der Plausibilitätsprüfung.....	68
Tab. 19:	Kosten der Kühlungs-systeme bezogen auf ein Abteil und Jahr.	77
Tab. 20:	Randbedingungen der Strömungssimulationen.	86
Tab. 21:	Übersicht über die Tierzahlen und -gewichte für den Zeitraum 18.08.-26.08.2011 und 17.08. - 21.08.2012.	98
Tab. 22:	Zeitliche und prozentuale Angabe zur Überschreitung des THI-Wertes von 85 im Zeitraum 18.08. – 26.08.2011 und 17.08. – 21.08.2012 (Wärmste Tage in den Jahren).....	102
Tab. 23:	Bewertung der Kühlsysteme im Bezug zu dem gleichen Abteil ohne Kühlung. Einfluss auf das Stallklima. (o = Standard/Referenzabteil, ++ = sehr gut, -- = sehr schlecht).....	119

Tab. 24:	Bewertung der Zuluftsyste me bezüglich Differenzdruck und Luftvolumenstrom. (o = Standard, ++ = sehr gut, -- = sehr schlecht)	120
Tab. 25:	Ranking der Abteile anhand der Emissionswerte über den gesamten Messzeitraum 2011 und 2012. (HDB = Hochdruckbefeuchtung).....	122
Tab. 26:	Ranking der Abteile in Bezug auf die Emissionswerte über die Messzeiträume mit einer Außentemperatur >22°C 2011 und 2012. (HDB = Hochdruckbefeuchtung) ...	123
Tab. 27:	Ranking der Abteile in Bezug auf die Emissionswerte über die Messzeiträume in den Jahren 2011 und 2012 (HDB = Hochdruckbefeuchtung).....	124
Tab. 28:	Jahresdurchschnittskonzentrationen der einzelnen Abteile in den Jahren 2011 und 2012. (HDB = Hochdruckbefeuchtung)	125
Tab. 29:	Emissionswerte und Ranking der Praxisbetrie be A (Erdwärmetauscher), B (Unterflurzuluft) und C (Hochdruckbefeuchtung) über den gesamten Messzeitraum mit einer Außentemperatur >22°C im Jahr 2011 und 2012.	127
Tab. 30:	Durchschnittliche Schadgaskonzentration der Abteile über den gesamten Messzeitraum mit einer Außentemperatur >22°C 2011 und 2012.....	128
Tab. 31:	Vergleich und Einordnung der Ø Schadgaskonzentrationen in den Abteilen mit Werten aus der Literatur. Untersuchungszeitraum Boxberg (Mai 2011 bis Sep. 2012), Praxisbetrie be unregelmäßige Messungen im Zeitraum (Jan. 2012 bis Sep. 2012) (HDB = Hochdruckbefeuchtung; EWT = Erdwärmetauscher)	130
Tab. 32:	Vergleich und Einordnung der Schadgasemissionen mit Werten aus der Literatur und eine Bewertung der drei Kühlungssysteme an der LSZ Boxberg mit dem Referenzabteil. Untersuchungszeitraum Boxberg (Mai 2011 bis Sep. 2012), Praxisbetrie be unregelmäßige Messungen im Zeitraum (Jan. 2012 bis Sep. 2012) (HDB = Hochdruckbefeuchtung; EWT = Erdwärmetauscher) (o = Standard, ++ = sehr gut, +- = gut, - = schlecht, -- = sehr schlecht).....	132
Tab. 33:	Tränkwasserverbrauch pro Abteil und Jahr.....	155
Tab. 34:	Energieverbrauch der Heizungen aller Abteile der Jahre 2011 und 2012. (HDB= Hochdruckbefeuchtung).....	156
Tab. 35:	Energetische Angabe zur Kühlung der verschiedenen Kühlungssysteme. (HDB= Hochdruckbefeuchtung).....	157
Tab. 36:	Mehrkosten der Abteile mit Kühlungssystem in Bezug zum Referenzabteil (ohne Kühlung) für die Jahre 2011 und 2012. Kosten setzen sich aus der Abschreibung, Verzinsung sowie Wasser- und Stromverbrauch zur Kühlung in den Jahren zusammen.....	159
Tab. 37:	Stromverbrauchskosten der Abluftventilatoren je Tierplatz und Jahr. (Strompreisannahme: 0,19 € kWh ⁻¹).	160
Tab. 38:	Größenordnung, um die die Tageszunahmen zur Deckung der Mehrkosten der Kühlungssysteme nicht absinken dürfen, im Vergleich zum Referenzabteil. (Annahme: Schlachtpreis 1,40 € kg ⁻¹ , mindestens 82 Tage > 22°C)	160
Tab. 39:	Preise der Energiekosten bei unterschiedlichen Szenarien.....	161
Tab. 40:	Mehrkostenberechnung der Kühlungssysteme im Bezug zum Referenzabteil unter der Annahme der aktuellen Energiepreise. Verbrauchswerte aus dem Mittelwert der Jahresverbräuche 2011 und 2012 gebildet.....	161
Tab. 41:	Szenarioanalysen zu Energie-und Schlachtpreisen. Darstellung der Mehrkosten der Kühlungssysteme bzw. der benötigten höheren TZG zum Mehrkostenausgleich. (Annahme: Mindestens 82 Tage > 22°C).....	163

Tab. 42:	Vergleich des Energieverbrauchs der Ventilatoren an der LSZ Boxberg zu Literaturangaben.....	164
Tab. 43:	Zusammenfassung der Nutzbarkeit (pro / contra) und Standortempfehlung	187

1 EINLEITUNG

Die Deutsche Agrarforschungsallianz (DAFA) geht bei den Entwicklungstendenzen in der Nutztierhaltung weltweit von einem weiter anhaltendem Wachstum aus (DAFA, 2012). Um diesen wachsenden Fleischverbrauch weiterhin weltweit zu decken, wird die Tierhaltung weiter intensiviert. In Deutschland handelt es sich hierbei meist um geschlossene, zwangsbelüftete Anlagen. Im Fokus der Öffentlichkeit sind dabei sowohl Haltungsverfahren, Umweltwirkung als auch Stallklimabedingungen im Tierbereich relevante Diskussions-themen.

Der Tierhalter ist dazu verpflichtet, die Temperaturbedingungen und Schadgaskonzentrationen im Tierbereich tiergerecht zu gestalten. Beispielsweise soll die Rauminnentemperatur möglichst im Optimalbereich (thermoneutralen Bereich) der Tiere liegen (JUNGBLUTH et al., 2005; HOY et al., 2006). Insbesondere im Sommer werden zusätzliche Maßnahmen mit Hilfe der Zuluftführung und technischer Kühlungseinrichtungen erforderlich.

Zur Umweltdiskussion trägt unter anderem die Freisetzung von klima- und umweltrelevanten Gasen bei, insbesondere Kohlendioxid (CO_2), Ammoniak (NH_3) und Methan (CH_4). Hier hat sich die Politik das Ziel gesetzt, bis 2020 die Treibhausgas-Emission um 40% und bis 2050 um mindestens 80% gegenüber dem Jahr 1990 zu senken (BMW i & BMU, 2011). Eine Emissionsminderung in der Schweinehaltung kann zum einen indirekt über die Einsparung von elektrischer- und Heizenergie aus fossilen Rohstoffen erfolgen, zum anderen direkt durch die Verminderung der Bildung und Freisetzung der Schadgase im Stall durch verfahrensintegrierte Maßnahmen bei Haltung, Fütterung und Lüftung (GALLMANN, 2003).

Die Optionen zur Verbesserung der Haltungsbedingungen und Umweltwirkung sind auch im Kontext der Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Lösungsansätze zu betrachten.

1.1 Problemstellung

In zwangsbelüfteten Schweineställen stellen hohe Außentemperaturen besondere Anforderungen an den Betriebsleiter und die Lüftungstechnik. Nach der DIN 18910 (2004) soll die Stallinnenlufttemperatur so wenig wie möglich über die Außenlufttemperatur steigen. Dies führt je nach Außentemperatur aber immer noch zu Hitzestress bei den Tieren. Um dies zu verhindern, wird in der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (TierSchNutztV, 2009) unter § 22 (2) 4 gefordert, dass „eine geeignete Vorrichtung vorhanden ist, die eine Verminderung der Wärmebelastung der Schweine bei hohen Stalltemperaturen ermög-

licht“. Welcher Art diese Vorrichtung sein soll bzw. welche Kühlleistung dieser erbringen soll, ist jedoch nicht beschrieben.

In der Praxis haben sich unterschiedliche Zuluftführungs- und Kühlmöglichkeiten etabliert. Die Abkühlung der Luft erfolgt entweder über einen Wärmetausch entlang der Zuluftwege oder bei wasserbasierten Systemen über adiabatische Kühlung. Bei wasserbasierten Systemen kann das Stallklima auch negativ beeinflusst werden, wenn je nach Temperatur die relative Luftfeuchte zu hoch ist.

In den meisten bisherigen Arbeiten wurden nur einzelne Kühlmöglichkeiten auf unterschiedlichen Betrieben und Betriebszweigen untersucht, sodass die Ergebnisse durch Standort-, Betriebs- und Managementfaktoren geprägt sind. Dadurch ist ein direkter Vergleich der einzelnen Kühlungssysteme hinsichtlich Stallklima, Emissionen, Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit auch im Vergleich zu einer Referenz ohne Kühlung kaum möglich.

1.2 Zielsetzung

Hauptziel der Arbeit ist es, die jeweilige Eignung, Wirksamkeit und Vorzüglichkeit verschiedener Verfahren der Zuluftführung und Kühlung von Schweinemastställen unter Praxisbedingungen an der LSZ Boxberg und auf Praxisbetrieben darzustellen.

Adiabatische Kühlung:

- Oberflurzuluft durch Porendecke mit Hochdruckbefeuchtung (LSZ Boxberg und Praxisbetrieb)
- Flächenkühler auf Wasserbasis vor der Zuluftöffnung, Oberflurzuluft durch Porendecke (LSZ Boxberg)

Wärmetausch auf den Zuluftwegen:

- Unterflurzuluftführung über Servicegang (LSZ Boxberg und Praxisbetrieb)
- Erdwärmetauscher (Rippenrohrtauscher), Zuluft über Servicegang (Praxisbetrieb)

Referenz ohne Kühlung:

- Oberzuluft über Porendecke, ohne Kühlung (LSZ Boxberg)

Die Untersuchungsschwerpunkte liegen auf der Erfassung und Bewertung der Stallklimaparameter (Temperatur, relativer Luftfeuchte, Differenzdruck, Gaskonzentrationen), der Gasemissionen sowie der Energie- und Ressourceneffizienz. Die Betrachtungsebene ‚Tier‘ wird durch die Erfassung und Auswertung ausgewählter Tierleistungsdaten, Indikatoren des Tierverhaltens und Tiergesundheitsparameter in die Untersuchungen einge-

schlossen. Aspekte der Wirtschaftlichkeit und Handhabung werden abschließend bewertet.

Neben den aktiven Messungen werden zusätzlich mittels einer Strömungssoftware modellhaft Lüftungsszenarien simuliert, die eine qualitative Beurteilung der Luftbewegungen und Zuluftverteilungen zulassen.

2 KENNTNISSTAND

2.1 Gesetze

Es gibt eine Vielzahl an Gesetzen, die beim Bau einer Stallanlage beachtet werden müssen. Darunter fallen u.a. das Baugesetzbuch (BauGB), das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG), das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG), das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG), die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft), das Tierschutzgesetz (TierSchG) und die Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (TierSchNutzV). In der TA Luft (2002) wird neben Vorgaben zur Einhaltung von Abständen von Stallungen zu Wohngebieten auch im Kap. 5.4.7.1 d) darauf verwiesen, dass bei zwangsbelüfteten Ställen das Stallklima nach DIN 18910 (2004) gestaltet werden muss. In dieser wird auf Basis der Wasserdampf-, Kohlenstoffdioxid- und Wärmebilanz der Luftmassenstrom berechnet. Zugleich werden tierarten- und altersspezifische Optimalbereiche für Lufttemperatur und relative Luftfeuchte angegeben. Im TierSchG (2010) ist speziell bezüglich des Stallklimas festgelegt, dass das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrats, soweit es zum Schutz der Tiere erforderlich ist, die Anforderungen an die Halter von Tieren nach § 2 näher bestimmen darf und dabei insbesondere Vorschriften erlassen kann über die Lichtverhältnisse und das Raumklima der Ställe ((§ 2 a (1) TierSchG, 2010). In der TierSchNutzV (2009) werden entsprechend neben allgemeinen Anforderungen an die Nutztierhaltung auch Grenzwerte für Schadgaskonzentrationen (Tab. 1) sowie Mindestanforderungen an die Stallfläche (Tab. 2) vorgegeben. Darüber hinaus wird unter § 22 (2) 4. TierSchNutzV gefordert, dass „eine geeignete Vorrichtung vorhanden ist, die eine Verminderung der Wärmebelastung der Schweine bei hohen Stalltemperaturen ermöglicht.“

Tab. 1: Grenzwerte von Schadgaskonzentrationen im Aufenthaltsbereich der Schweine. (Verändert nach § 26 (3) 1. TierSchNutzV, 2009)

Schadgas	[cm ³ m ⁻³]
Ammoniak (NH ₃)	20
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	3000
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)	5

Tab. 2: Mindestanforderung an eine uneingeschränkt nutzbare Bodenfläche für Mast-
schweine (verändert nach § 29 (2) 2. TierSchNutztV, 2009).

Durchschnittsgewicht [kg]	Fläche [m ²]
> 30 bis 50	0,5
50 bis 110	0,75
> 110	1,0

2.2 Stallklima

Das Stallklima setzt sich aus der Stalltemperatur, der relativen Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit, dem Luftvolumenstrom, dem Gehalt an gasförmigen Verbindungen, Staub, der Keimkonzentration, Lichtintensität und dem Lärmpegel zusammen (KIRSCHNER et al., 1976; SEUFERT, 1986; VAN CAENEGEM & WECHSLER, 2000; JUNGBLUTH et al., 2005; HOY et al., 2006). Hierbei gilt es, die einzelnen Parameter auf die physiologischen Bedürfnisse der Tiere anzupassen. Diese hat SEUFERT (1986) in der Abb. 1 unter den Punkten Standort, Bauausführung, Wärmebilanzierung und raumtechnische Anlage zusammengefasst. Die für die Arbeit wichtigsten Parameter bzw. physiologischen Bedürfnisse der Tiere sind unter den folgenden Punkten aufgeschlüsselt.

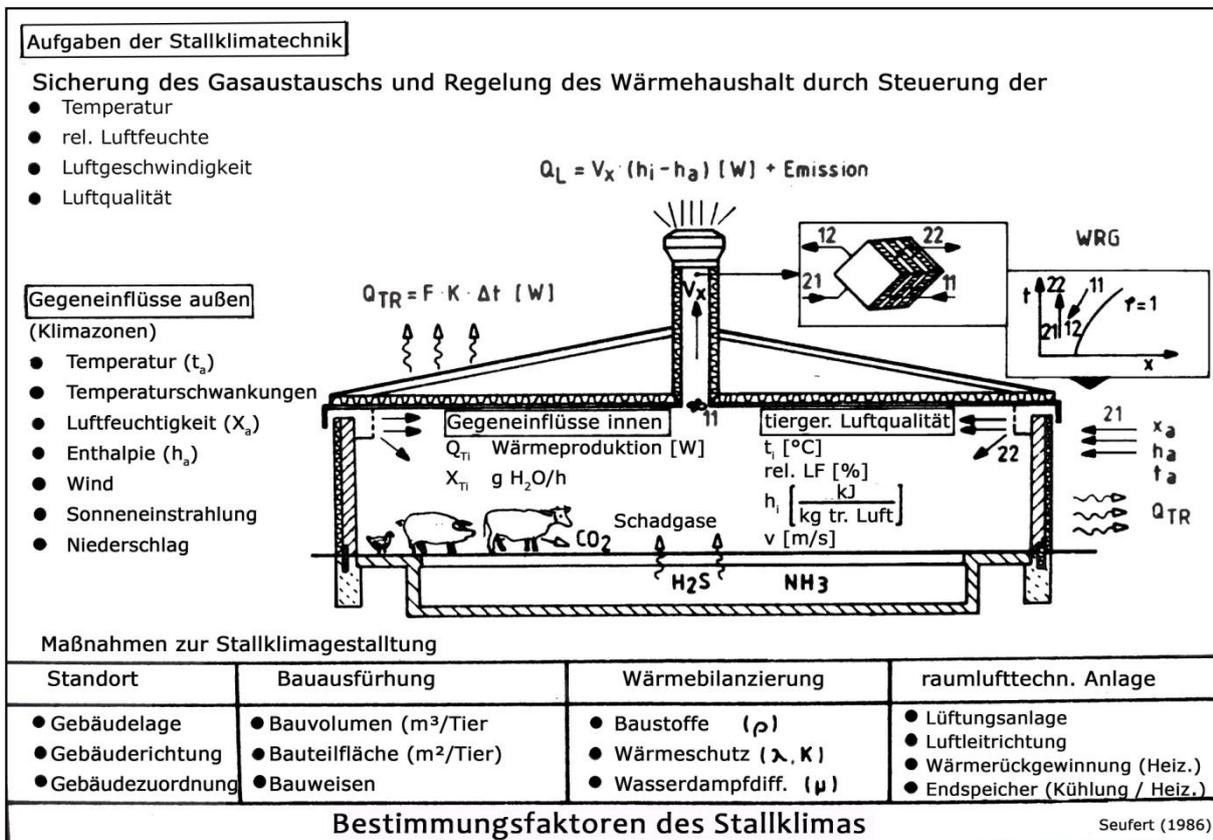


Abb. 1: Bestimmungsfaktoren des Stallklimas (SEUFERT 1986)

Temperatur

Der optimale Temperaturbereich für ein Mastschwein (40 bis 100 kg) liegt zwischen 14°C und 20°C (DIN 18910, 2004). Dies ist zugleich die thermisch neutrale Temperatur bzw. die Komfortzone (siehe Abb. 2). Das heißt, bei dieser Umgebungstemperatur ist der Energieumsatz eines Tieres minimal (HOY et al., 2006). Dieser kann sich durch steigende Tageszunahme der Tiere verschieben. Werte darüber oder darunter werden als kritische Temperatur bezeichnet und führen zu Leistungseinbrüchen in der Tageszunahme. Laut VENZLAFF & MÜLLER (2008) ist bei der Abkühlung von extrem hohen Außentemperaturen um 5 bis 7 K eine Steigerung von 56 g d⁻¹ möglich. Im umgekehrten Fall ist bei je 1 K Temperaturabsenkung unter den Optimalbereich ein Rückgang der Tageszunahme um 24 g zu erwarten (HOY et al., 2006). KIRCHGEßNER (2004) beschreibt bei einer Temperatur von 10°C eine 13% geringere Gewichtsentwicklung. Er geht zudem davon aus, dass bei einer Temperatur über 25°C geringere Tageszunahmen zu erwarten sind.

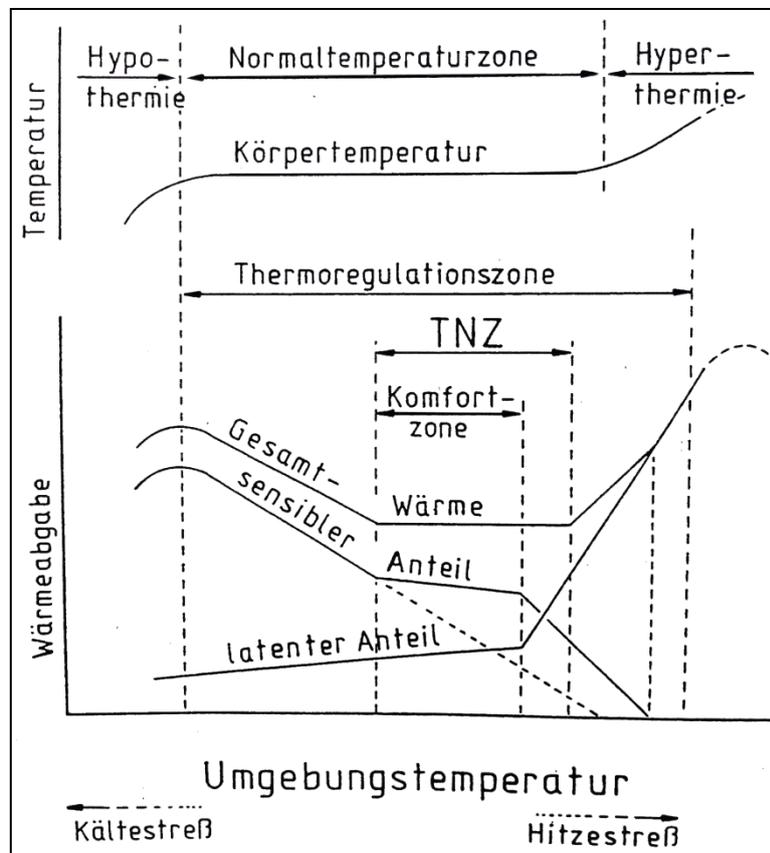


Abb. 2: Zone der Temperaturregulation, Körpertemperatur sowie Verschiebung der Anteile von latenter und sensibler Wärmeabgabe an der Gesamtwärmeabgabe in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur (HILLMAN, 1985).

Damit die Tiere ihre Körpertemperatur (~39,3°C, je nach Alter) halten können, stehen ihnen folgende Mechanismen zur Verfügung (JUNGBLUTH et al., 2005; HOY et al., 2006):

- Innerer Wärmestrom: Wärmeenergie-Transport vom Körperinnern zur Haut
- Äußerer Wärmestrom: Wärmeenergie-Transport vom Organismus an die Umgebung über
 - o Konduktion (Leitung)
 - o Konvektion (Mitführung)
 - o Radiation (Strahlung)
 - o Evaporation (Verdunstung)
- Futter und Wasseraufnahme und Ausscheidung von Exkrementen

Unter der Konduktion wird der Wärmeübergang von einem Körper zu einem anderen verstanden. Bei der Konvektion wird beispielsweise die Wärme an der Hautoberfläche an die vorbeiströmende Luft übertragen. Die Radiation (Wärmestrahlung) besagt, dass jeder Körper oberhalb des absoluten Nullpunktes eine gewisse Wärmeleistung abstrahlt. Die ausgestrahlte Wärmeleistung ist dabei von der Körperoberfläche abhängig (ABSHOFF, 1974). Diese drei genannten Transportarten sind ein sensibler Wärmestrom. Unter der Wärmeabgabe durch die Evaporation versteht man die Umwandlung von Wasser (flüssig) zu Wasserdampf (gasförmig). Die Evaporation wird auch als latenter Wärmestrom bezeichnet. Dies ist bei steigenden Temperaturen die einzige effektive Möglichkeit für Schweine, Wärme abzugeben (siehe Abb. 3). Eine detaillierte Beschreibung dieser Möglichkeit bietet das vorliegende Kapitel unter Punkt Tiergerechtheit. JUNGBLUTH et al. (2005) zählen zusätzlich die Futter- und Wasseraufnahme bzw. das Ausscheiden von Exkrementen als zusätzliche Abgabemöglichkeiten der Wärme. Hauptfaktor ist dabei die Erwärmung der aufgenommenen Nahrung auf Körpertemperatur.

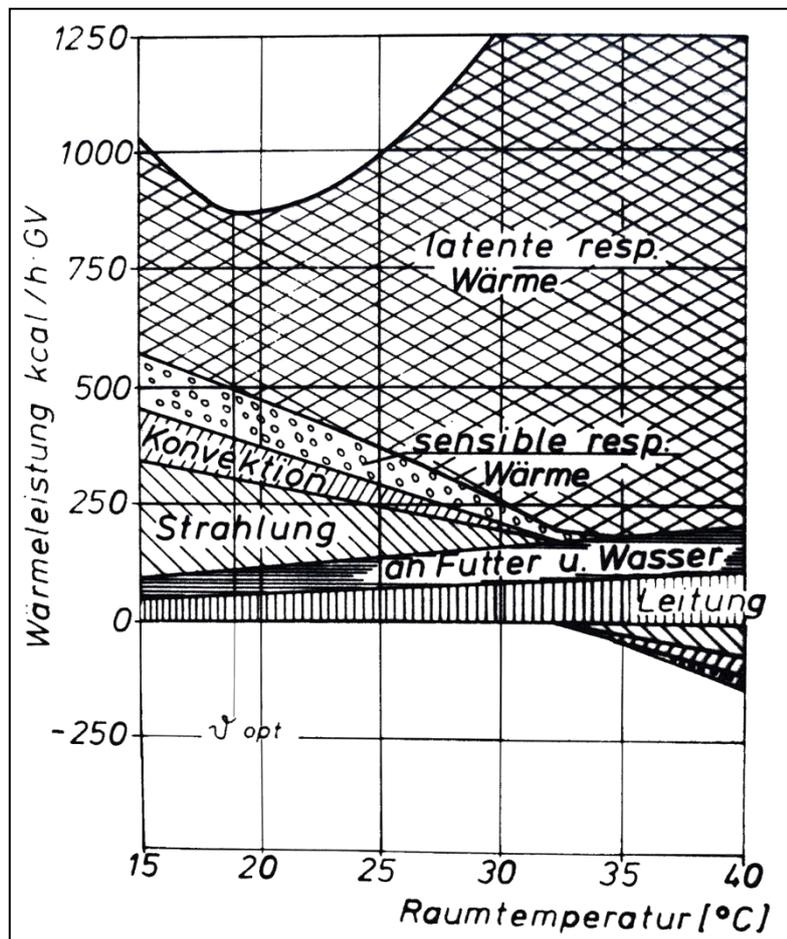


Abb. 3: Wärmeleistung in kcal / GV·h bei Mastschweinen mit 100 kg Lebendmasse bei unterschiedlichen Temperaturen (ABSHOFF, 1974).

Relative Luftfeuchte

Die relative Feuchte gibt den Sättigungsgrad der Luft an Wasserdampf bei einer bestimmten Temperatur und Druck an (GLÜCK, 1991; KRETZSCHMAR & KRAFT, 2011). Nach der DIN 18910 (2004) soll die relative Luftfeuchte in Ställen ohne Heizung zwischen 60% und 80% liegen. In Ställen mit Heizung liegen die Zielwerte zwischen 40% und 70%. Weiterhin gilt zu beachten, dass die Evaporation bei steigender bzw. hoher relativer Luftfeuchte abnimmt (vgl. Abb. 4). Dies in Kombination mit hohen Temperaturen führt zu körperlichen Belastungen der Tiere und damit zu einer Leistungsdepression. Dies zeigt sich in einem Tageszunahmerückgang von bis zu 50%. Genauso negativ wirken sich geringe Stalltemperaturen und hohe relative Feuchtwerte aus. Diese können zu Entstehungen von Atemwegserkrankungen führen (HOY et al., 2006).

Neben den Auswirkungen auf das Tier haben hohe relative Luftfeuchtwerte auch eine negative Auswirkung auf die Bausubstanz des Stalles (HOY et al., 2006).

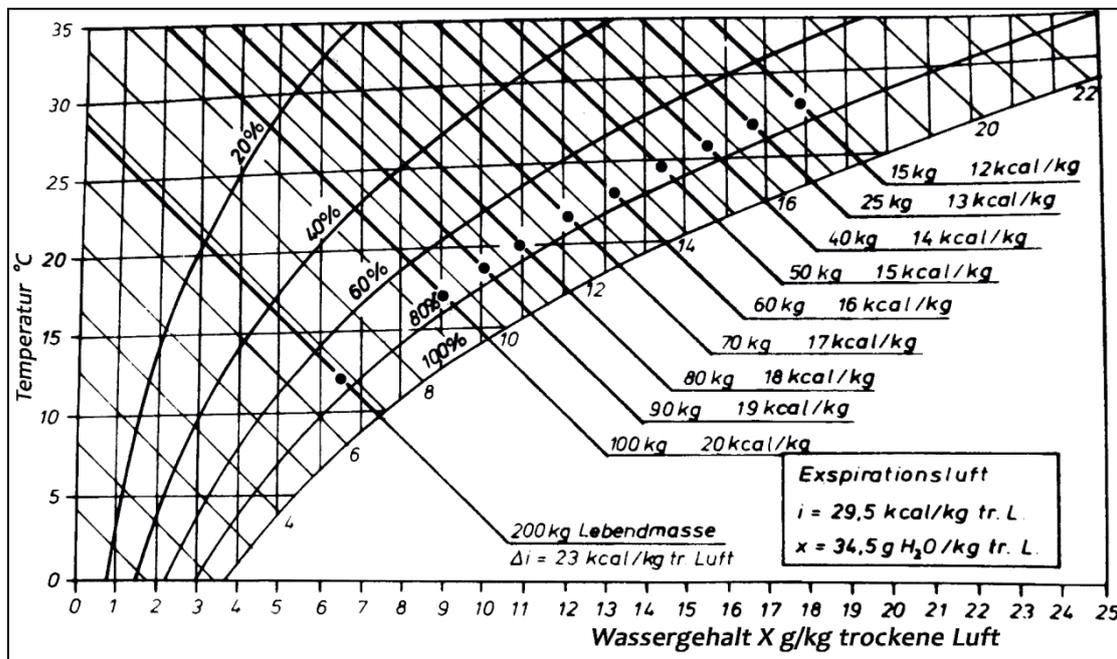


Abb. 4: Die optimale Umgebung für verschieden schwere Schweine an Hand des hx-Diagrammes (ABSHOFF, 1974).

Luftgeschwindigkeit

In der DIN 18910 wird eine Obergrenze von $0,2 \text{ m s}^{-1}$ empfohlen. Eine erhöhte Luftgeschwindigkeit führt zu einer Steigerung der Konvektion. So ist im Sommer bei ausgewachsenen Tieren und einer Stalllufttemperatur größer 24°C eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit im Tierbereich bis auf $0,6 \text{ m s}^{-1}$ sinnvoll.

Wenn die Luftgeschwindigkeit so hoch ist, dass ein Luftstrahl entsteht, der auf das Tier wirkt, spricht man von einem Luftzug. Dabei ist entscheidend, wie schnell die Luftbewegung ist und welche Temperatur die Luft aufweist. Sobald dies zusammen einen Schwellenwert überschreitet, spricht man von Zugluft. Der Schwellenwert ist wiederum vom Alter des Tieres und den herrschenden klimatischen Bedingungen abhängig (BÜSCHER, 1991). Zugluft wirkt sich im Allgemeinen negativ auf die Tiere aus, da dadurch Erkältungskrankheiten gefördert werden. Besonders im Liegebereich ist ein Luftzug zu vermeiden (VAN CAENEGEM & WECHSLER, 2000).

Luftvolumenstrom

Der Luftvolumenstrom wird nach der DIN 18910 berechnet und dient dem Austausch der Stallluft. Dabei sollen im Sommer u.a. Wärme und im Winter vornehmlich Schadgase und Wasserdampf abgeführt werden. In der Tab. 3 sind beispielhaft Planungsdaten für einen $14 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ großen, mit Vollspaltenboden und Flüssigfütterung ausgestatteten Stall auf-

geführt. Im Durchschnitt wurde mit einem Tiergewicht von 70 kg bei einer kontinuierlichen Mast gerechnet.

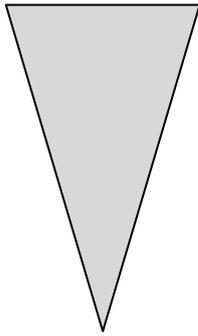
Tab. 3: Planungsdaten Luftvolumenstrom je Einzeltier für die Sommer- und Wintersituation (DIN 18910, 2004) (Bsp. An einem 40 x14 m großen Vollspaltenbodenstall mit 70 kg schweren Mastschweinen.)

Planungswerte	Mastschweine				
Einzeltiergewicht [kg]	30	50	70	100	120
Luftvolumenstrom je Tier [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$]					
Sommer: Temperaturzone 2: Außentemperatur > 26°C Temperaturdifferenz: 2,0 K	53	74	86	108	119
Sommer: Temperaturzone 1: Außentemperatur < 26°C Temperaturdifferenz: 3,0 K	35	49	57	72	79
Winter: Luftfeuchte 80%, Temperatur: 22 bis 16°C	6,9	9,4	11,5	14,1	15,6

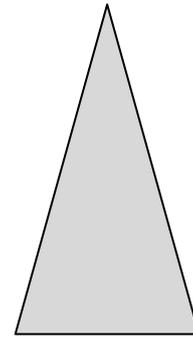
Die Arbeitsgemeinschaft für Elektrizitätsanwendung in der Landwirtschaft (AEL) empfiehlt in ihrem Heft 17 (VAN DEN WEGHE et al., 2007), im Winter eine Luftwechselrate von drei zu erreichen. Dennoch sollte die Sommer- und Winterluft rate immer für den jeweiligen Stall explizit berechnet werden. Die dazu nötigen beispielhaften Rechenhilfen sind ebenfalls in Heft 17 der AEL gelistet.

Um einen gleichmäßigen Austausch der Stallluft zu ermöglichen, gibt es unterschiedliche Zuluft einströmsysteme. Diese werden zusammen mit dem jeweiligen Einfluss auf die Verdrängung der Raumluft und die Impulswirkung auf die Raumluft in der folgenden Abbildung gezeigt.

Impulswirkung auf die Raumluft (Luftwalzen)



Düsen mit verstellbarem Querschnitt
 Schrägbrett über ges. Traufenlänge
 Schlitze (space boarding)
 Folienschläuche
 Rieselkanäle bzw. -decken
 Porenkanäle bzw. decken



Verdrängung der Raumluft (Strömung diffus)

Abb. 5: Differenzierung der Zulufteströmsysteme nach ihrer Impuls- bzw. Verdrängungswirkung auf die Raumluft (BÜSCHER, 1991).

Schadgaskonzentration und Emissionsgeschehen

Hinsichtlich der Schweinehaltung in geschlossenen Ställen spielen die Gase Ammoniak (NH_3), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Schwefelwasserstoff (H_2S) und Methan (CH_4) die wichtigste Rolle. Die Bedeutung der H_2S – Emission ist in der Schweinehaltung hingegen gering (HAHNE et al., 1999), da es nur unter besonderen Umständen und erhöhten Konzentrationen eine Gefahr für Tier und Mensch darstellt (KRAUSE et al., 2010). CO_2 hat die höchste Konzentration der genannten Gase, es entsteht überwiegend durch die Atmung der Tiere. Dagegen entstehen NH_3 und CH_4 aus den Exkrementen. Zugleich ist CO_2 ein Indikator für schlechte Stallluft und kann dahingehend zur Steuerung der Stalllüftung genutzt werden. (GALLMANN, 2003; DIN 18910, 2004; HÄUßERMANN, 2006; VAN CAENEGEM et al., 2010).

NH_3 und CH_4 sind bei höherer Konzentration im Stall gesundheitsschädigend. Die Auswirkungen können bei NH_3 zu einer Leistungsminderung (ISENSEE & CIELEJEWSKI, 1984), Husten und reduzierter Futteraufnahme (STROMBAUGH et al., 1969) bis hin zu Kannibalismus führen (BLENDL et al., 1971).

BARTUSSEK et al. (2001) konnten in ihrer Untersuchung bei signifikant schlechterer Luft in einem von zwei Stallteilen (Ø 46 ppm NH_3 ; Ø 3610 ppm CO_2 ; Ø 77% relative Luftfeuchte) keine Unterschiede bei der Untersuchung der Lunge feststellen, es wurde allerdings eine signifikant schlechtere Tageszunahme gemessen. Grund dafür war eine schlechtere Futterverwertung. Eine schlechtere Futteraufnahme wurde jedoch nicht festgestellt. Zugleich waren die Schwankungen der Tageszunahme zwischen den zwei Wiederholungen größer als der Unterschied zwischen dem gut und dem schlecht gelüfteten Abteil.

Methan als Schadgas für die Tiere ist von geringer Bedeutung, da es unter normalen Umständen nicht in so hohen Konzentrationen im Stall vorkommt, dass ein Effekt bei den Tieren auftreten würde.

Die Gase CO₂ und CH₄ gehören zu den klimarelevanten Gasen. NH₃ stellt in höheren Konzentrationen eine Umweltbelastung für Pflanzen, Gewässer und Böden dar. Das nationale und internationale Ziel ist es, diese Emissionen zu verringern (BMW_i & BMU, 2012; UBA, 2012). Hierzu wurden in unterschiedlichen Projekten mehrere Lösungsansätze speziell für die Schweinehaltung untersucht. Diese sind in Tab. 4 zusammengefasst.

Tab. 4: Beispiele zur Reduktion der NH₃- und CH₄ Emissionen in der Mastschweinehaltung mit Zwangslüftung (Quelle in Anlehnung an GALLMANN, 2003).

Maßnahme	Reduktionspotential auf Anhaltswert		Autor
Haltungstechnik			
Gestaltung der Bodenoberfläche	NH ₃	20 - 40%	VAN DEN WEGHE (2001)
Gruppengröße	NH ₃ , / CH ₄	25 – 40% / k. A.	VAN DEN WEGHE (2001)
Anteil an Spalten und Tierplatzaufteilung	NH ₃ , CH ₄	10 – 20% / k. A.	KIRSCHNER et al., (1976); AANINK (1997); VAN DEN WEGHE (2001);
Entmistung			
Spühsystem, einschließlich V-Rinnen	NH ₃	63 – 70%	KECK (1997)
pH-Wert-Absenkung	NH ₃ , CH ₄	k. A. / bis 90%	FROSCH & BÜSCHER (2001)
Kühlung des Flüssigmistes	NH ₃	75%	DEN BROK & VERDOES (1997)
Entleerung und Reinigung des Flüssigmistkellers	CH ₄	k. A.	HÄUßERMANN (2006)
Lüftungstechnische Maßnahme			
Lüftungssteuerung, Temperatur, Zuluftkühlung Erdwärmetaucher	NH ₃ ,	10 – 15%	VAN DEN WEGHE (2001); RATHMER (2002); GALLMANN (2003); HÄUßERMANN (2006)
Unterflurzuluftführung	NH ₃	bis 25%	MÜLLER & VENZLAFF (2007)
Indirekte Absenkung der Flüssigmisttemperatur durch angepasste Lüftung und Lüftungssteuerung	NH ₃	10% pro 1°C geringere Flüssigmisttemperatur	AARNINK (1997)
Futterganglüftung mit Oberflurabsaugung i. Vgl. zu Deckenstrahllüftung mit Oberflurabsaugung	NH ₃	10 – 20%	KECK (1997)
Befeuchtungskühlung	CH ₄	bis 35%	HÄUßERMANN (2006)
Kühlung der Zuluft (Erdwärmetauscher)	NH ₃	bis 35%	EPINATJEFF et al. (1997)
Durch Unterflurzuluftführung oder Erdwärmetauscher	NH ₃	>25%	VENZLAFF & MÜLLER (2008)
Fütterungsstrategien			
Futterzusammensetzung (gute Proteinverwertung)	NH ₃	k. A.	KIRCHGESGEßNER (2004); RATMER, (2002)

Viele der beschriebenen Minderungsstrategien üben auch einen reduzierenden Einfluss auf CO₂ aus. Der größte Produzent von CO₂ sind allerdings die Tiere durch die Atmung selbst. Zusätzlich wird über die Exkremete CO₂ freigesetzt (GALLMANN, 2003). Ein an-

derer Produzent von CO₂ in der Schweinehaltung sind die auf fossilen Brennstoffen basierenden Heizungssysteme. RÖSMANN (2012) beschreibt, dass durch eine Wärmerückgewinnung (WRG) ca. 85% an CO₂-Emissionen gegenüber einer herkömmlichen Heizung eingespart werden können. Beim Erdwärmetauscher (EWT) sind es ca. 89% und bei der Grundwasserwärmepumpe 8,8% bis 12,2%.

Ein direkter Zusammenhang zwischen der Schadgaskonzentration und der Schadgasemission besteht darin, dass diese vom Luftvolumenstrom (Gleichung (1)) und der wiederum von den Jahreszeiten abhängig ist. So ist die Schadgaskonzentration in einem zwangsbelüfteten Stall im Winter bei niedrigem Luftvolumenstrom hoch, da es zu einem geringen Austausch an Luft im Stall kommt. Hintergrund ist der, dass möglichst wenig Wärme verloren gehen soll. Im Sommer steigt der Luftvolumenstrom um das Fünf- bis Siebenfache an (DIN 18910, 2004). Dadurch ist ein großer Austausch der Stallluft pro Stunde möglich, wodurch die Schadgaskonzentration sinkt. Da der Anstieg des Luftvolumenstroms höher ist als das Absinken der Schadgaskonzentration, ergibt sich im Sommer oft auch eine höhere Emission. Weiterhin begünstigen höhere Temperaturen im Sommer die Bildung und Freisetzung der Schadgase (KECK, 1997; RATHMER, 2002; GALLMANN, 2003; HÄUßERMANN, 2006; VENZLAFF & MÜLLER, 2008).

$$e_i = \dot{V} \cdot c_i \quad (1)$$

e_i [g h⁻¹] : Tagesmittelwert des Emissionsmassenstroms

\dot{V} [m³ h⁻¹] : Tagesmittelwert des Volumenstroms

c_i [ppm] : Konzentration

Tiergerechtheit

Die Tiergerechtheit ergibt sich nach SUNDRUM (1998) (siehe Abb. 6) aus mehreren Indikatoren. Zu den tierbezogenen Indikatoren zählen physiologische, biochemische, biophysikalische, pathologische und ethologische Parameter. Die technischen bzw. bautechnischen Indikatoren beinhalten Raumstruktur sowie Raummaße, Gestaltung, Einrichtungselemente, Stallklima und Hygiene. Verschiedene Formen des Nutztiermanagements, die Betreuungsintensität, der Pflegezustand sowie die Qualifikation der betreuenden Person gehören zu den managementspezifischen oder auch tierhalterbezogenen Indikatoren.

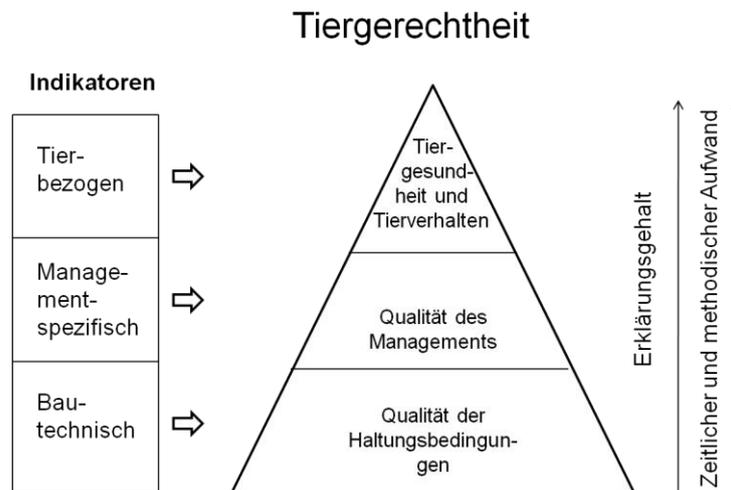


Abb. 6: Hierarchisches Konzept zur Beurteilung der Tiergerechtigkeit von Haltungssystemen auf betrieblicher Ebene in der landwirtschaftlichen Praxis (SUNDRUM, 1998).

Zur Beurteilung von praxisüblichen Haltungsbedingungen wird ein Konzept benötigt, welches praxis- und tierschutzrelevante Indikatoren in einem Bewertungssystem zusammenfasst. Wichtig ist, dass die Indikatoren gut erfassbar, objektivierbar und interpretierbar in Bezug auf ihr Ergebnis sind. Der Aufwand der Erhebung und die Aussagekraft hinsichtlich der Tiergerechtigkeit sollen dabei im Verhältnis stehen (SUNDRUM ET AL., 1994).

Es werden Beurteilungsverfahren für Haltungsbedingungen in direkte und indirekte Erhebung unterschieden.

Bei indirekten Methoden wird anhand technischer Indikatoren auf die Tiergerechtigkeit geschlossen. Beispielsweise werden das Flächenangebot und die Vielfalt an Beschäftigungsmaterialien erfasst. Anhand direkter Methoden wird die Anpassungsfähigkeit der Tiere an die Haltungsumwelt beurteilt (WEBER & VALLE ZARATE, 2005). Diese Methoden werden am Tier eingesetzt, wodurch ein hoher Arbeitsaufwand entsteht. Sie können ethologisch, pathologisch oder physiologisch fokussiert sein. Situationsabhängig können auch Leistungsdaten herangezogen werden (KNIERIM, 1998).

Indirekte Beurteilungsverfahren für Haltungssysteme sind:

- TGI (Tiergerechtheitsindex)
Haltungssysteme nach unterschiedlichen Einflussbereichen mit einem Punkteraster bewerten (VAN DEN WEGHE, 1998; PFLANZ, 2007)
- CCP – (critical control points)
Vier Schwerpunkte innerhalb der Fragebögen: Tierverhalten, Hygiene, Umwelt und Management. Anders als bei den TGI's werden alle Fragen gleich gewichtet. Eine

generalisierte Einstufung der Tiergerechtheit wird nicht vorgenommen (PFLANZ, 2007).

Tierverhalten zur Thermoregulation

Der Thermoregulation kommt bei Schweinen eine besonders hohe Bedeutung zu. Tiere, welche in freier Wildbahn leben oder denen aufgrund ihres Haltungssystems genügend Platz zur Verfügung steht, haben verschiedene Strategien, um bei Kälte oder Hitze ihre Körpertemperatur konstant zu halten. Bei für das Tier zu kalten Temperaturen werden die Verkleinerung des Oberflächen-/Volumen-Verhältnisses und der Ortswechsel beobachtet. Ersteres beschreibt das Zusammenrollen der Tiere oder die Gruppenbildung. Die Tiere versuchen, dadurch so wenig Wärme wie möglich an die Umgebung zu verlieren. Zweites beschreibt das Aufsuchen eines anderen Mikroklimas, welches weniger kalt oder sogar indifferent ist. Bei zu warmen Temperaturen verändert das Tier seine Körperhaltung, sodass mehr Wärme an die Umgebung abgegeben wird, oder es sucht, wie bei kalten Temperaturen auch, einen Mikroklimabereich auf, welcher nicht so warm ist.

Eine weitere Möglichkeit der Thermoregulation besteht in der Erhöhung der Verdunstungskühlung. Hier wird die Hautoberfläche mit Wasser oder Schlamm benetzt und die Verdunstungskälte genutzt (STOLPE & BRESK, 1985). Schweine besitzen am Körper keine Schweißdrüsen und können somit nicht schwitzen. Bei kalten Temperaturen sind sie über ihre subkutane Fettschicht gut isoliert und haben nur geringe Wärmeverluste, bei wärmeren Temperaturen regulieren sie ihre Körpertemperatur über die Schleimhäute im Nasen- und Rachenraum (MAYER ET AL., 2006), indem sie zu hecheln beginnen. Reicht dieses nicht mehr aus, nutzen sie Verdunstungskühlung. Untersuchungen ergaben, dass Schweine bereits ab Temperaturen von 18°C eine Suhle zur Kühlung aufsuchen (HOY, 2009). Steht den Tieren in ihrem Haltungssystem keine Suhle zur Verfügung, suhlen sie sich in ihrem Kot und Urin (GRAUVOGEL, 1986). Durch die Bereitstellung von Berieselungsanlagen oder Duschen, welche die Tiere mit Wasser bespritzen, kann verhindert werden, dass sie ihre Raumstruktur durchbrechen und sich in ihrem Kot und Urin wälzen (ZALUDIK, 2002).

Leichtere Tiere (<30 kg) können höhere Umgebungstemperaturen gut vertragen und kompensieren, bei schwereren Tieren setzt bereits bei 28°C eine Hechelatmung ein. Niedrigere Futteraufnahme und gesteigerte Wasseraufnahme sind erste Anzeichen für eine Hitzebelastung. Durch einen hohen Tierbesatz in der Endmast ist das Liegen der Tiere ohne

den Körperkontakt zu einem anderen Tier fast unmöglich. Daher empfiehlt sich die ständige Vermarktung der schwersten Tiere (BUSCH & SCHLENKER, 2010).

2.3 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit setzt sich aus den Produktionskosten und dem Erlös zusammen. Da der Landwirt nur einen geringen Einfluss auf den Erlös hat und dieser auch sehr stark schwankt (siehe Abb. 7), gilt es die Produktionskosten zu optimieren.

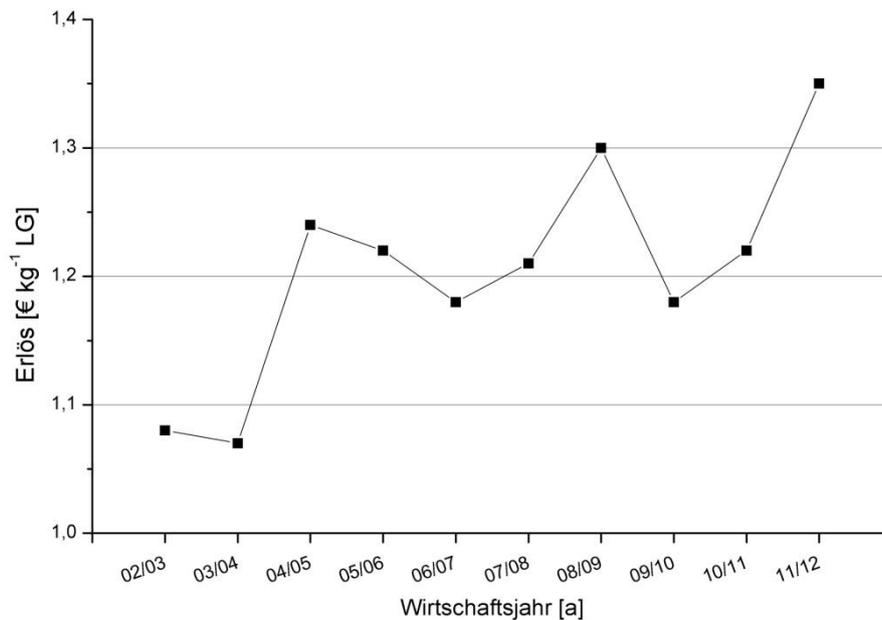


Abb. 7: Erlöse für Mastschweine seit dem Jahr 2002 (LKV, 2012)

Eine Möglichkeit ist hierfür die Energieeinsparungen zu verbessern. Die wichtigsten Punkte im geschlossenen, perforierten Schweinemaststall sind der Stromverbrauch und die Heizenergie. Abb. 8 nach KTBL (2012) zeigt den hohen Energieverbrauch der Heizung. An zweiter Stelle steht der Verbrauch der Ventilatoren. Im Durchschnitt liegt der Energieverbrauch bei $70,4 \text{ kWh TP}^{-1}\text{a}^{-1}$, dabei beträgt der geringste Gesamtverbrauch $55,1 \text{ kWh TP}^{-1}\text{a}^{-1}$ und der höchste Energieverbrauch $100,9 \text{ kWh TP}^{-1}\text{a}^{-1}$ (KTBL, 2012). Zu ähnlichen Aussagen gelangen auch SEIFERT et al. (2009) mit einem Energieverbrauch von $71 \text{ kWh TP}^{-1}\text{a}^{-1}$ und VAN CAENEGEM et al. (2010) mit einem Verbrauch von ca. 83 bis $156 \text{ kWh TP}^{-1}\text{a}^{-1}$.

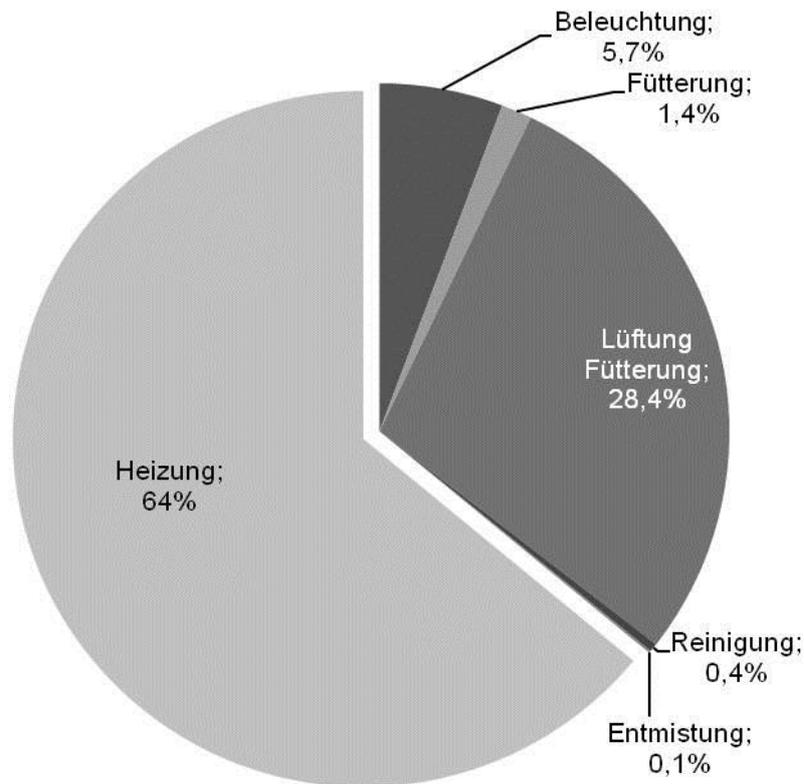


Abb. 8: Anteil der Energieverbrauchsbereiche (verändert nach KTBL 2012)

Zur **Senkung der Heizkosten** gibt es unterschiedliche Ansätze. Mittels eines Erdwärme- bzw. Rippenrohrtauschers sind Einsparungen zwischen 58% und 96% möglich (VAN CAENEGEM et al., 2010; VAN CAENEGEM & DIDIER, 1998). Dabei besitzt beispielsweise der Durchmesser der Rippenrohre einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit (siehe Abb. 9). VAN CAENEGEM & DIDIER (1998) zeigten, dass die Einsparungen nicht die erhöhten Investitionskosten decken. So kostete ein Mastplatz ohne Erdwärmetauscher (EWT) pro Jahr 10 Franken. Mit EWT dagegen, trotz der Einsparung der Wärme von 100 kWh je Mastplatz und Jahr, kostete er 23 Franken. BECK & EPINATJEFF (1997) ermittelten in ihrer Untersuchung einen ~15 % geringeren Gewinn pro Tier bei einem Abteil mit EWT gegenüber einem konventionellen Abteil.

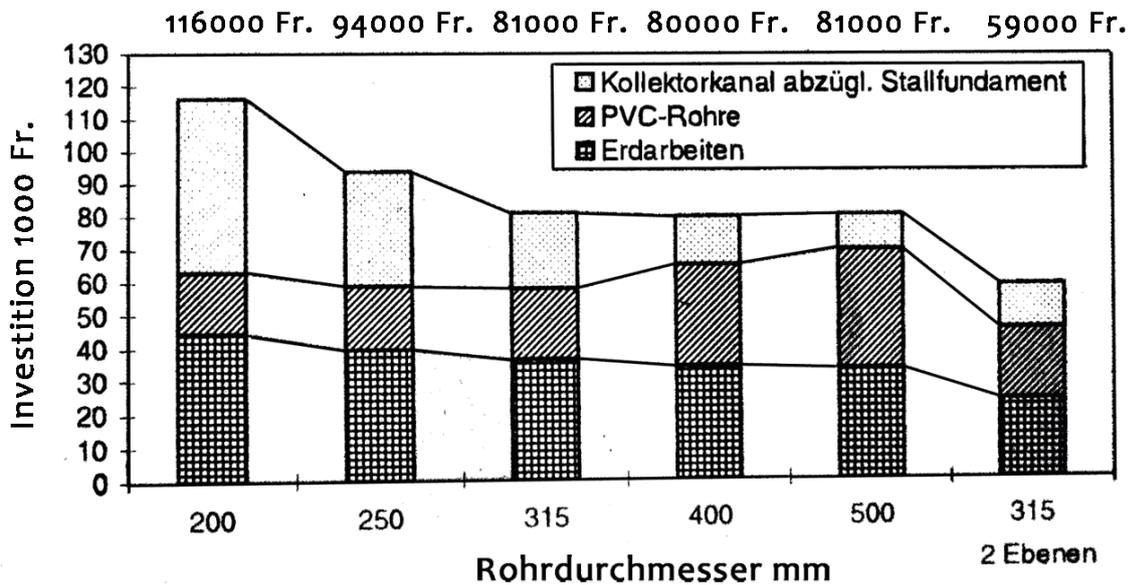


Abb. 9: Einfluss des Durchmessers und der Anordnung der Rohre auf die Investitionen eines Erdwärmetauschers für 300 Mastplätze (VAN CAENEGEM & DIDIER, 1998).

Hinsichtlich der Unterflurzulufführung wird in den Berichten von VAN CAENEGEM (2007) und VENZLAFF & MÜLLER (2008) ein Wärmegewinn der Zuluft festgestellt. Es wird weiterhin festgehalten, dass keine nennenswerten Zusatzkosten bezüglich des Baues oder des Betriebs entstehen. BEYERSDORFER & GERNAND (2012) geben in ihrer Untersuchung einen Mehrbetrag von 6,3% (4350 € zu 4626 €) für den Bau einer Unterflurzuluft je Abferkelplatz an. In der Arbeit von RÖSMANN (2012) belaufen sich die Mehrkosten eines Modulstalles (Prinzip der Unterflurzuluft) auf 20 € je Tierplatz. Dabei ergeben sich spezifische Gesamtkosten zwischen 0,8 und 6,4 Cent kWh⁻¹ je nach Wärme- und Kältenutzung. Zum Vergleich hatten in derselben Untersuchung ein Luft-Luft Wärmetauscher spezifische Gesamtkosten von 2,1 Cent kWh⁻¹ und eine Grundwasser-Wärmepumpe zwischen 7,7 und 8,5 Cent kWh⁻¹.

Die Stromkosten der Ventilatoren steigen bei den Ställen mit Erdwärmetauschern oder Wärmetauscher im Vergleich zu konventionellen Ställen an. In der Untersuchung von VAN CAENEGEM et al. (2010) liegen sie zwischen 4,8% und 26% je nach Stalldämmung.

Zur Kühlleistung werden in der Literatur meist nur Vermutungen auf den wirtschaftlichen Effekt in Form von verbesserten Zunahmen angestellt (VAN CAENEGEM & DIDIER, 1998; VAN CAENEGEM et al., 2010). BEYERSDORFER & GERNAND (2012) geben eine Steigerung der abgesetzten Ferkel von 0,3 bis 0,5 je Wurf an.

KIRSCHNER et al. (1976) berechneten zusätzlich den Mehrerlös durch die Senkung klimabedingter Tierverluste, die sich auf 7,2% (191 Tiere) beliefen, das wiederum einem finanziellen Verlust von 25900 Mark pro Jahr entsprach.

2.4 Zuluftvarianten und Kühlungssysteme

Die Möglichkeiten einen Stall zu kühlen sind vielfältig. Manche der Kühlung dienliche Faktoren sind bei der Planung einfach zu realisieren, beispielsweise die Luft im Sommer nicht von der Südseite des Stalles anzusaugen (VENZLAFF & MÜLLER, 2008). Andere Umsetzungen werden durch den wirtschaftlichen Aspekt eingeschränkt (ABSHOFF, 1974; KIRSCHNER et al., 1976). Die aktuellen Kühlsysteme funktionieren auf zwei Arten. Der eine Teil nutzt Wasser zur adiabatischen Kühlung, der andere Teil nutzt den Pufferspeicher des Erdreichs. Im Folgenden werden als Kühlvarianten das Kühlpad, die Hochdruckbefeuchtung, der Erdwärmetauscher und die Unterflurzuluft vorgestellt.

2.4.1 Kühlpad

Das Kühlpad nutzt die adiabatische Abkühlung der Luft. Bei diesem System wird Wasser von einem Sammeltank hinauf in eine Rinne gepumpt. In dieser Rinne befinden sich mehrere Löcher, durch die das Wasser gleichmäßig auf das Kühlpad fließt. Das Kühlpad besteht aus einer Pappe in Wabenstruktur, deren Öffnungen in Richtung des Luftweges gerichtet sind. Die Luft strömt durch diese Öffnungen hindurch und nimmt dabei Wasser von den feuchten Pappewänden auf. Der überschüssige Wasseranteil, den die Pappe bzw. die Luft nicht aufnimmt, läuft an der Unterseite des Kühlpads zusammen und gelangt zurück in den Sammeltank. Durch die Aufnahme des Wassers verliert die Luft an Wärme. Da auch hier die Luft nicht zu feucht in das Abteil strömen soll, wurde darauf geachtet, dass die Luft mindestens einen Weg von 3 bis 4 m zurücklegt, bis sie in ein Abteil gelangt. Auf diesem Weg steigt die Wärme der Luft wieder etwas an, sodass die relative Luftfeuchtigkeit sinkt. Das Kühlpad kann auch aus Hohlziegeln statt aus Pappe bestehen. Mit einem solchen Kühlpad wurden in den Jahren 2009 und 2010 im Rahmen eines Modellvorhabens (Kühlung eines Sauenstalls. CIELEJEWSKI, et al., 2010) und finanziert durch das BMELV, Untersuchungen durchgeführt. Der Kühleffekt zwischen Außentemperatur und Lufttemperatur direkt nach der Kühlwand lag bei durchschnittlich 4 K. Wärmespitzen der Außentemperatur konnten abgepuffert werden. Ein Anstieg der Luftfeuchtigkeit durch den Einsatz der Kühlwand konnte nicht festgestellt werden, allerdings wird in der Auswertung auf die auffällig trockenen Bedingungen vor allem im Jahr 2009 hingewiesen. Für das Jahr 2009 wurden etwa 26,7 m³ Wasser und 98,45 kWh Strom bei einer Einsatzzeit von 375,8 h be-

nötigt. Im Jahr 2010 verbrauchte die Kühlwand etwa 40,25 m³ Wasser und 168 kWh Strom bei einer Laufzeit von 638 h (CIELEJEWSKI et al., 2010)

2.4.2 Hochdruckbefeuchtung

Die Hochdruckbefeuchtung wird im DLG Merkblatt 346 (RATSCHOW et al., 2008) als die beste Kühlungsvariante zwischen Nieder-, Mittel- und Hochdruckbefeuchtung beschrieben. Zugleich ist sie aber auch mit 1700 € das teuerste der drei Systeme. Zusätzlich wird für kalkhaltiges Wasser ein chemischer Filter bzw. ein Ionentauscher empfohlen. Dieser kostet ca. 1500 €.

Bei der Hochdruckbefeuchtung wird vor dem Abteil eine Pumpe installiert, die einen Druck von mindestens 70 bar erzeugen kann. Dieses unter Druck stehende Wasser wird über zwei Leitungen an den beiden Längsseiten ins Abteil geleitet. Entlang der Längsseiten sind im gleichen Abstand jeweils acht Düsen angebracht, über die das Wasser im Abteil vernebelt wird. Diese werden mindestens nach jedem Mastdurchgang demontiert und entkalkt. Um eine Verstopfung der Pumpe durch Partikel zu verhindern, muss das Wasser eine Filteranlage durchlaufen. Eine weitere Maßnahme besteht darin, eine Entkalkungsanlage bei einem Wasserhärtegrad größer 10° einzubauen. Dies hilft auch, das Verkalken der Düsen zu verhindern.

Hochdruckanlagen kühlen die Umgebungstemperatur schnell und effektiv ab und verbessern die sensible Wärmeabgabe der Tiere. Richtig montierte und dimensionierte Anlagen verhindern ein Befeuchten von Oberflächen und Einstreu (HÄUßERMANN, 2006).

Neben der beschriebenen Anbringung der Düsen im Abteil besteht auch die Möglichkeit, die Zuluft direkt zu befeuchten (LEHMANN et al., 2011). Bei der Untersuchung von LEHMANN et al. (2011) in einem Sauenstall wurde ein Abkühlen der Luft im Sommer von 6 K erreicht. Die Temperaturabkühlung ist zugleich von der Trockenheit der Zuluft abhängig. Zur Betriebssicherheit wurde festgestellt, dass die Düsen einer ständigen Wartung unterliegen müssen. Der generelle Einsatz wurde von Häufigkeit und Dauer heißer Sommerzeiten abhängig gemacht.

2.4.3 Unterflurzuluft

Bei der Unterflurzulufführung wird die Luft unter dem Stall hindurch geleitet, wobei die Luft Wärme aufnimmt bzw. abgibt. Dies hängt davon ab, in welcher Jahreszeit man sich befindet und welche Außentemperaturen herrschen. Da die Wände des Kanals unter der Erde

liegen, dient das Erdreich im Winter als Wärmespeicher, welcher Wärme abgibt und im Sommer Wärme aufnimmt. Dabei findet der größte Austausch zwischen der Luft und den Wänden statt. Diese Luft gelangt am Ende durch die Spalten des Versorgungsganges in das Abteil, in dem die Luft über die Buchtenwände steigt und in den Tierbereich eintritt. Dies ist besonders im Winter wichtig, da so eine gleichmäßige Erwärmung stattfinden kann. Im Sommer besteht die Möglichkeit, den Kanal mit Wasser zu fluten, um die Lufttemperatur zusätzlich zu senken und die Luftfeuchte zu erhöhen. Die Planung spezieller Gänge ist beim Bau des Stalles zu berücksichtigen, die Kanäle der Unterflurzuluft sind allerdings nicht so tief ausgeführt wie die eines Erdwärmetauschers (\varnothing 2,5 m (VAN CAENEGEM & DIDIER, 1998)). Sie liegen in gleicher Tiefe wie Güllesammeleinrichtungen. Aus diesem Grund lässt sich das Verfahren relativ einfach in einen standardmäßigen Stallunterbau integrieren. Dadurch entsteht laut der Autoren zudem kein erheblicher finanzieller Mehraufwand (VENZLAFF & MÜLLER, 2008). Die Lufttemperaturabsenkung wird von VENZLAFF & MÜLLER (2008) auf 0,5 bis 2 K beschrieben. Die Amplitude der Temperaturschwankungen können von 20 K im Außenbereich auf 8 K im Stallinnenraum gesenkt werden. Bei den Untersuchungen von BEYERSDORFER & GERNAND (2012) in einem Abferkelstall wurde eine Abkühlung der Luft von 6 bis 8 K, bei GEIßLER (2008) von 8 bis 10 K gemessen.

2.4.4 Erdwärmetauscher

Der Erdwärmetauscher nutzt ebenfalls den Pufferspeicher des Erdreichs. Dabei werden zum Stall führende Dränagerohre im Erdreich verlegt. Ziel ist es, eine möglichst große Oberfläche mittels Rippen an den Rohren zu schaffen, da hier die Lufttemperatur im indirekten Austausch mit dem Erdreich steht. Es gilt: Je größer die Oberfläche und je langsamer die Luft sich durch das Rohr bewegt, desto größer ist die Temperaturangleichung der Luft an die des Erdreichs (VAN CAENEGEM & DIDIER, 1998). Gleichzeitig gilt aber auch, dass, je kleiner der Rohrdurchmesser, desto größer der Luftwiderstand ist, was letztlich zu höheren Stromkosten des Ventilators führt. Die Effektivität des Erdwärmetauschers wird auch durch die Verlegetiefe der Rohre bestimmt (JUNGBLUTH, 1987; TIEDEMANN, 1991; VAN CAENEGEM & DIDIER, 1998; VENZLAFF & MÜLLER, 2008). Weiterhin sind die Beschaffenheit des Erdreichs und der Grundwasserspiegel entscheidend für die Effizienz des Systems (JUNGBLUTH, 1987; TIEDMANN, 1991). Unter dem Stall befindet sich ein Sammelkanal, in dem die Rippenröhren enden. Von dort gelangt die Zuluft entweder durch einen Spaltenboden im Versorgungsgang ins Abteil, oder die Luft wird in den Dachraum

geleitet und kommt von dort in das Abteil. In unterschiedlichen Untersuchungen konnte ein Absenken der Außenluft um 4 bis 10 K gemessen werden (TIEDEMANN, 1991; EPINATJEFF et al., 1997; VAN CAENEGEM & DIDIER, 1998; DLG, 2005; VENZLAFF & MÜLLER, 2008; HESSEL & VAN DEN WEGHE, 2011; RÖSMANN, 2012). Neben der Kühlung ist der Erdwärmetauscher besonders durch die Wärmenutzung in Mitteleuropa interessant (JUNGBLUTH, 1987). Das Potential der Luftherwärmung liegt zwischen 5 und 13 K (TIEDEMANN, 1991; VAN CAENEGEM & DIDIER, 1998; VENZLAFF & MÜLLER, 2008).

2.5 Strömungssimulation

Die Luftströmung in Stallgebäuden lässt sich messtechnisch nur unter sehr großem Aufwand detailliert abbilden. Für die Interpretation der Ergebnisse von Stallklimamessungen und zur Erlangung eines Verständnisses für das Strömungsbild in unterschiedlichen Lüftungssystemen kann eine dreidimensionale Modellierung der Strömungsvorgänge hilfreich sein.

Durch die großen Fortschritte in der Leistung von Computern und die Entwicklung von vielseitiger und benutzerfreundlicher CFD-Software ist die Verbreitung dieser Technologie auch in den angewandten Wissenschaften wie der Agrartechnik in den letzten Jahren immer größer geworden (NORTON et al., 2007). Jährlich werden etwa 20 rezensierte Artikel im Themenbereich CFD in agrarwissenschaftlichen Fachjournals veröffentlicht, Tendenz steigend. Etwa 60% dieser Artikel beinhalten eine Validierung der Simulationen, was als wichtiges Qualitätskriterium gilt (LEE, 2012). Die Simulation der Lüftung, der Emissionen oder des Wärmeaustausches von Tierhaltungsanlagen konnte das Niveau von anderen Anwendungen wie z.B. Gewächshausimulationen bisher nicht erreichen (NORTON et al., 2007). Auf einer Skala von 1 bis 5 bewerten NORTON et al. (2007) die Realitätsnähe der Studien von GEBREMEDHIN & WU (2005), VAN WAGENBERG et al. (2004) und SUN et al. (2002) mit 3, 3 und 1 sowie die Aktualität der Methoden mit 4, 4 und 2. Diese Bewertung wird von den Autoren nicht im Detail erläutert. Sie verdeutlicht jedoch, dass die Untersuchungen mit der Zeit Fortschritte gemacht haben, generell aber auch weiterhin Verbesserungsbedarf der Simulationen von Tierhaltungsanlagen besteht. Die volle Ausnutzung der verfügbaren Möglichkeiten der CFD-Programme und der vorhandenen Rechnerkapazitäten ist hierbei entscheidend (NORTON et al., 2007).

Generell lassen sich zwei Hauptthemen von Strömungssimulationen in Tierhaltungsanlagen in der Literatur finden. Ein Teil der Veröffentlichungen beschäftigt sich vor allem mit

der Verbesserung der Simulation der Wärmeabgabe von Tieren und den Bedingungen im Strömungsbereich der Tiere. Der zweite Teil hat die Simulation von Teilen eines Gebäudes oder auch ganzer Ställe zum Gegenstand, mit dem Ziel, die Funktion des Lüftungssystems zu verbessern oder die Emissionen des Stalles zu senken.

2.5.1 Tiermodelle in CFD-Simulationen

Die Wahl des richtigen Randbedingungstyps für die Wärmeabgabe von Tiermodellen als auch die Angabe von konkreten Werten ist für sensible und latente Wärme sehr schwierig. Ein Ansatz, beides zu verbessern, sind Modelle, die das Tier als Festkörper mit einer Kerntemperatur, einem charakteristischen Wärmedurchgangswiderstand der Haut und einer Haarschicht betrachten (GEBREMEDHIN & WU, 2003).

NORTON et al. (2010a) zeigten hierbei zwei verschiedene Möglichkeiten. Eine besteht darin, ein Modell für die Wärmeübertragung an die Umwelt in Abhängigkeit von externen Strömungs- und Strahlungsbedingungen zu erstellen. Dieses Modell passt die Wärmeabgabe über den veränderlichen Wärmedurchgangswiderstand der Haut so an, dass eine konstante Temperatur im Körperinnern aufrechterhalten wird. Durch gezielte Variation von externen Bedingungen lassen sich Regressionsgleichungen erhalten, die dann in einer CFD-Simulation als thermische Randbedingung hinterlegt werden. So wird die Wärmeabgabe des Tieres bei der Simulation z.B. an die Strömungsgeschwindigkeit angepasst. Die zweite Möglichkeit besteht in einer direkten Einbettung von Haut und Haarkleid in das CFD-Tiermodell. NORTON et al. (2010a) wählten hierbei eine Halbkugel als Modell für ein Kalb und wiesen der Haut und dem Haarkleid des Tieres mehrere Zellschichten an der Oberfläche zu. Diese wurden mit entsprechenden Koeffizienten für die Wärmeleitung und den Strömungswiderstand in porösen Medien versehen. Bei der Simulation errechnete sich so eine den Strömungs- und Strahlungsbedingungen entsprechende Wärmeabgabe des Tieres. Die Schlussfolgerung aus dem Vergleich beider Ansätze ist, dass eine Nutzung des eigenständigen thermischen Modells als Randbedingung zu sehr guten Ergebnissen führt und die Konvergenz der CFD-Simulation wesentlich besser ist, als mit integriertem Modell. Grundsätzlich stellten die Autoren fest, dass bei erzwungener Konvektion die Wärmeabgabe der Tiere zur Berechnung des Strömungsfeldes komplett vernachlässigt werden kann (NORTON et al., 2010a; NORTON et al., 2010b).

GEBREMEDHIN & WU (2003) wählten einen anderen Ansatz. Sie stellten ebenfalls ein genaues thermisches Modell einer Kuh auf, wobei der Körper als Zylinder berechnet wurde. Gleichzeitig führten sie eine Strömungssimulation für die Umgebung von zehn Kühen

durch. Anschließend wurden die in der CFD-Simulation errechneten Luftgeschwindigkeiten an den Tieren in das thermische Modell gegeben und auf diese Weise die Wärmeabgabe von jeder Kuh errechnet. In einer weiteren Untersuchung wurde dieses Prinzip für einen Vergleich verschiedener Lufteinlass- und Auslassbedingungen angewendet (GEBREMEDHIN & WU, 2005).

Für die geometrische Darstellung von Tieren in CFD-Simulationen sind unterschiedliche Varianten in der Literatur zu finden. Sie reichen vom Quader (SUN, 2004) über Zylinder (ZHANG et al., 1999) und Halbkugeln (VAN WAGENBERG et al., 2004; NORTON et al., 2010b) bis hin zu detailgetreuen *Computer Aided Design* (CAD)-Modellen (SEO et al., 2012; GEBREMEDHIN & WU, 2005; KRAUSE & LINKE, 2010). Hierbei muss immer ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Komplexität der Modelle eingegangen werden, da sonst das Gitter zu viele Elemente enthält (SEO et al., 2012). Bei Geflügelställen, in denen die Tiere gleichmäßig verteilt sind, liefert auch ein Wärmefluss am Boden anstelle von Tiermodellen gute Ergebnisse (MOSTAFA et al., 2012). Es ist des Weiteren möglich, den Tierbereich als poröses Medium mit einem definierten Strömungswiderstand und einer volumetrischen Wärmequelle darzustellen (BJERG et al., 2008; BJERG & ZHANG, 2012).

2.5.2 CFD-Simulationen in Ställen

Numerische Strömungssimulationen in Stallgebäuden werden seit Anfang der Neunziger Jahre durchgeführt. Aufgrund begrenzter Rechenkapazitäten waren dies zunächst zweidimensionale Simulationen mit sehr einfachen Gittern (BÜSCHER, 1991). Da allerdings auch bei zweidimensionalen Randbedingungen dreidimensionale Strömungsmuster entstehen (BJERG et al., 1999), wurden seit dem Jahr 2000 vermehrt dreidimensionale Simulationen durchgeführt. Grundlegende Simulationen, die die Strömung über einem beheizten Modellschwein und den Einfluss von Buchtenabtrennungen und Modellschweinen auf die Raumströmung berechneten, wurden von einer dänischen Arbeitsgruppe veröffentlicht (ZHANG et al., 1999; BJERG et al., 2000). Von diesen Autoren wurden auch verschiedene Zuluftöffnungen für Strahlöffnungen simuliert (BJERG et al., 2002a; BJERG et al., 2002b). All diese Strömungsberechnungen wurden mit Messungen in Versuchsställen validiert. VAN WAGENBERG et al. (2004) erstellten eine sehr ausführliche Simulation verbunden mit Messungen von Strömungsgeschwindigkeit, Temperatur und Kohlenstoffdioxidgehalt der Luft in einem Ferkelaufzuchtstall mit Türganglüftung. Sie berechneten die Strömung in einem kompletten Stallabteil mit 8 Buchten und Tiermodellen. Auch SUN (2004) führte eine komplette Analyse eines Schweinemaststalles mit Tiermodellen durch, allerdings (SEO

et al., 2012; MOSTAFA et al., 2012). Diese Arbeiten stellen den aktuellen Stand in Bezug auf CFD-Simulationen in Stallgebäuden dar.

Ein Ziel der Strömungssimulationen ist es, die Verbesserung von Lüftungssystemen durch gezielte Variation von Parametern im Modell. So können Kosten für aufwändige Messungen in der Praxis gespart und ungeeignete Varianten schon vor einem Praxistest ausgeschlossen werden (BLANES-VIDAL et al., 2008; KRAUSE et al., 2009). So untersuchten KRAUSE & LINKE (2009 und 2010) den Einfluss verschiedener Anordnungen von Zuluft- und Abluftöffnungen auf die Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung im Tierbereich einer Mastschweinebucht. Einen ähnlichen Ansatz verfolgten SEO et al. (2012). Sie untersuchten die nötige Verkleinerung der Lufteinlassöffnung in einem Schweinemaststall im Winter zur Vermeidung von Kaltluftströmungen bei den Tieren. MOSTAFA et al. (2012) führten eine ähnliche Studie in einem Geflügelstall durch. Die Beeinflussung der Raumluftdurchmischung in einem Kälberstall durch unterschiedliche windbrechende Materialien wurde von NORTON et al. (2010b) dargestellt.

3 MATERIAL UND METHODE

Um die komplexe Aufgabenstellung der unterschiedlichen Zuluftführungs- und Kühlmethoden in Mastschweinställen und deren Auswirkung auf den Energiebedarf, das Emissionsgeschehen, das Tierwohlbefinden sowie die Wirtschaftlichkeit zu bewerten, musste eine umfangreiche Messtechnik installiert werden. Zusätzlich wurden Tierbeobachtungen und Strömungssimulationsrechnungen durchgeführt. Um die Ergebnisse besser nachvollziehen und einordnen zu können, werden Material und Methode ausführlich beschrieben.

3.1 Betriebsbeschreibung

Insgesamt wurden vier Betriebe untersucht. Dabei lag der Schwerpunkt der Untersuchungen am Bildungs- und Wissenszentrum Boxberg für Schweinehaltung, Schweinezucht (Landesanstalt für Schweinezucht - LSZ) in Boxberg. An diesem Standort konnten unter nahezu gleichen Bedingungen mehrere Lüftungs- und Kühlungssysteme miteinander verglichen werden. Vor diesem Hintergrund fallen die Beschreibungen der Versuche an der LSZ Boxberg umfangreicher aus. Die Praxisbetriebe wiesen unterschiedliche Kühlungsvarianten auf. Gewählt wurden ein Betrieb mit einem Erdwärmetauscher (Betrieb A), einer mit Unterflurzulufführung (Betrieb B) und ein Betrieb mit einer Hochdruckbefeuchtung (Betrieb C).

3.1.1 LSZ-Boxberg

Die Hauptuntersuchungen fanden am Bildungs- und Wissenszentrum Boxberg für Schweinehaltung, Schweinezucht (Landesanstalt für Schweinezucht - LSZ) in Boxberg (Baden-Württemberg) statt. Die Gesamtanlage wurde 2007 fertiggestellt und besteht aus den Bereichen konventionelle und alternative Schweinehaltung. Innerhalb dieser Halungsverfahren sind die Produktionsabschnitte Ferkelerzeugung, Ferkelaufzucht und Schweinemast untergebracht. Die genaue Beschreibung der Aufgabenbereiche der LSZ Boxberg sowie die Position der einzelnen Stallanlagen findet man auf der eigenen Homepage (www.lsz-bw.de).

Für die vorliegenden Untersuchungen wurde der wärme gedämmte (konventionelle) Mastschweinstall mit unterschiedlicher Messtechnik ausgestattet (siehe Abb. 10). Genauere Erläuterungen bietet Punkt 3.3.1 Messtechnik an der LSZ Boxberg.

Das Stallgebäude liegt auf einer Höhe von 345 m über Normalnull. Tab. 5 zeigt die Wetterdaten der vor Ort befindlichen Wetterstation. Diese Daten werden vom landwirtschaftlichen Technologiezentrum Augustenberg zur Verfügung gestellt.



Abb. 10: Anlage der LSZ – Boxberg, rechts im Bild der wärmege­dämmte Mastschweine­stall

Tab. 5: Wetterdaten der Wetterstation Boxberg (LTZ AUGUSTENBERG, 2013)

Jahr	Ø Temperatur [°C]	min. Temperatur [°C]	max. Temperatur [°C]	Niederschlag [mm]
2009	9,4	-17,0	35,0	508
2010	8,3	-15,0	34,3	561
2011	10,1	-10,3	33,8	678
2012	9,7	-19,2	36,2	826

Der Maststall ist als Kammstall aufgebaut. Dieser ist in vier Bauteile (A-D) gegliedert, Abb. 11 zeigt die Ausrichtung des Stalles. Im Bauteil A befinden sich die Futterlager sowie einige Funktionsräume und die eigens für die Untersuchung gebaute Messkammer. Die Gebäudeteile B bis D sind mit einem gedämmten Satteldach ausgestattet. Zusätzlich sind die Dächer mit einer Fotovoltaikanlage ausgerüstet. In Gebäudeteil D ist die Ferkelaufzucht untergebracht. Die Gebäudeteile B und C bestehen jeweils aus 3 Mastabteilen, welche als B1, B2, B3 und C1, C2, C3 bezeichnet werden. Jedes der Abteile ist 16,01 m lang und 9,53 m breit und besteht aus 6 Buchten und einer Krankebucht. Die zwei südlich gelegenen Abteile der Bauteile B und C unterscheiden sich in der Höhe von den anderen Abteilen, da sie über die Unterflurzuluft mit Frischluft versorgt werden. Dadurch haben sie eine geschlossene Decke, was in diesem Fall zu einem höheren Abteil führt. Es entsteht hier eine Raumhöhe von 3 m. Die Raumhöhe der restlichen vier Abteile beträgt 2,85 m.

Alle Abteile sind mit Vollspaltenboden versehen, welcher einen normalen und einen verminderten Schlitzanteil aufweist. Der Trog der sensorgesteuerten Flüssigfütterungsanlage ist mittig angeordnet.

Um einheitliche Versuchsbedingungen zu schaffen, wurden alle Abteile gleich umgebaut. Lediglich bei dem Abteil mit der Unterflurzuluft mussten der Versorgungs- und Kontrollgang aus Lüftungstechnischen Gründen bis zum Ende des Abteils verlaufen.

In den Abteilen, die über eine Porendecke mit Frischluft versorgt werden, sind Warmwasserheizungen in Form von unlackierten Aluminiumrohren (Deltarohre, Abb. 16) verbaut. Sie sollen die einströmende Luft anwärmen. Diese Rohre sind ca. 45 cm unter der Porendecke angebracht. Zum zusätzlichen Aufheizen der Abteile sind an den Längsseiten in einer Höhe von 1,2 m sogenannte Wastraplatten angebracht. Sie sind Richtung Bucht geneigt und werden ebenfalls über Warmwasserrohre versorgt. Wastraplatten geben einen Großteil ihrer Wärme in Form von Wärmestrahlung ab, während Deltarohre hauptsächlich konvektiv Wärme abgeben. Bei der Unterflurzuluft sind unter dem Versorgungsgang, sprich am Einlass der Zuluft zum Abteil, an den Wänden Wastraplatten angebracht. Zusätzlich wurden an den Ost- und Westeinlässen der Unterflurzuluftkanäle im Gebäudeteil A Wastraplatten zum Frostschutz montiert.

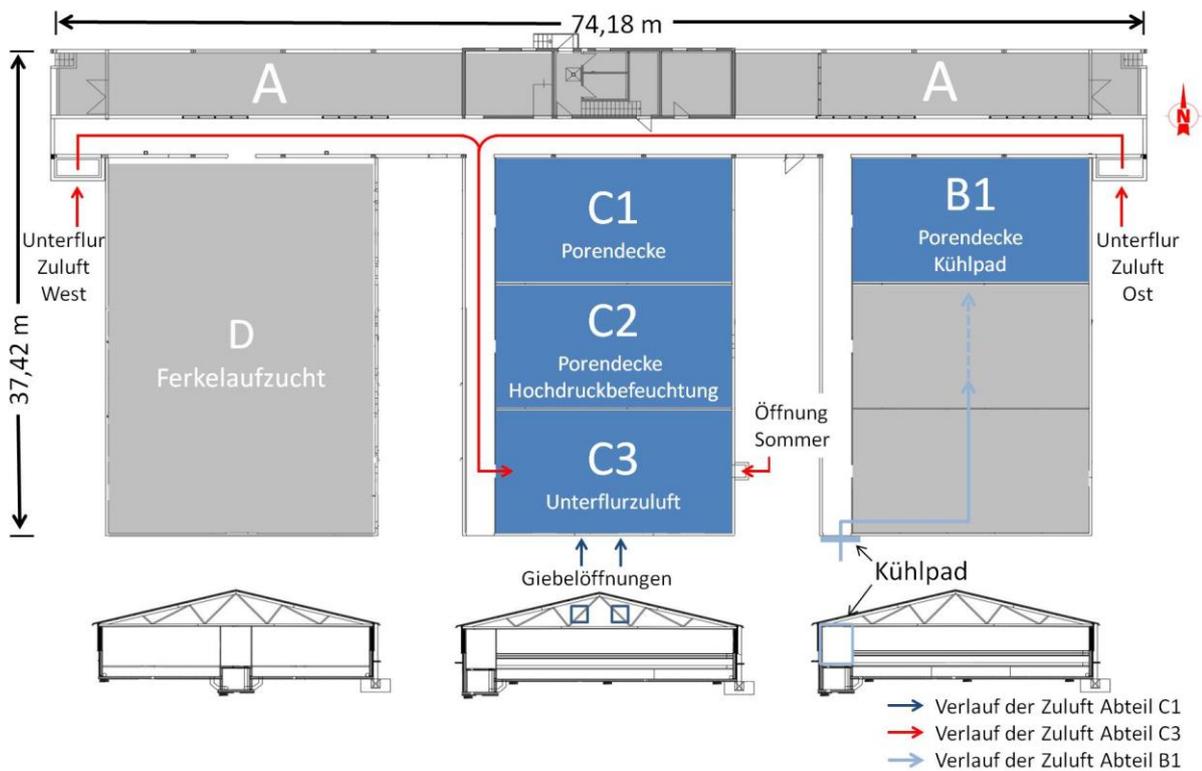


Abb. 11: Schematischer Grundriss des Mastschweinebaus und Lüftungswege an der LSZ Boxberg.

3.1.1.1 Tierbesatz und Abteilbeschreibung

Die LSZ Boxberg ist als geschlossenes System konzipiert. Es wird in einem Dreiwochenrhythmus gearbeitet, sodass jeweils ein Versuchsabteil alle drei Wochen neu eingestallt werden kann. Die Veränderung des Ein- und Ausstalltermins war aufgrund dieser festen Produktionszyklen nicht möglich. Das Einstallgewicht der Schweine in das Mastabteil liegt zwischen 32 kg und 35 kg und es werden pro Abteil 125 Tiere eingestallt. Die ersten Tiere werden bereits nach 12 Wochen bei einem Mastgewicht von ca. 116 kg ausgestallt (siehe Abb. 12).

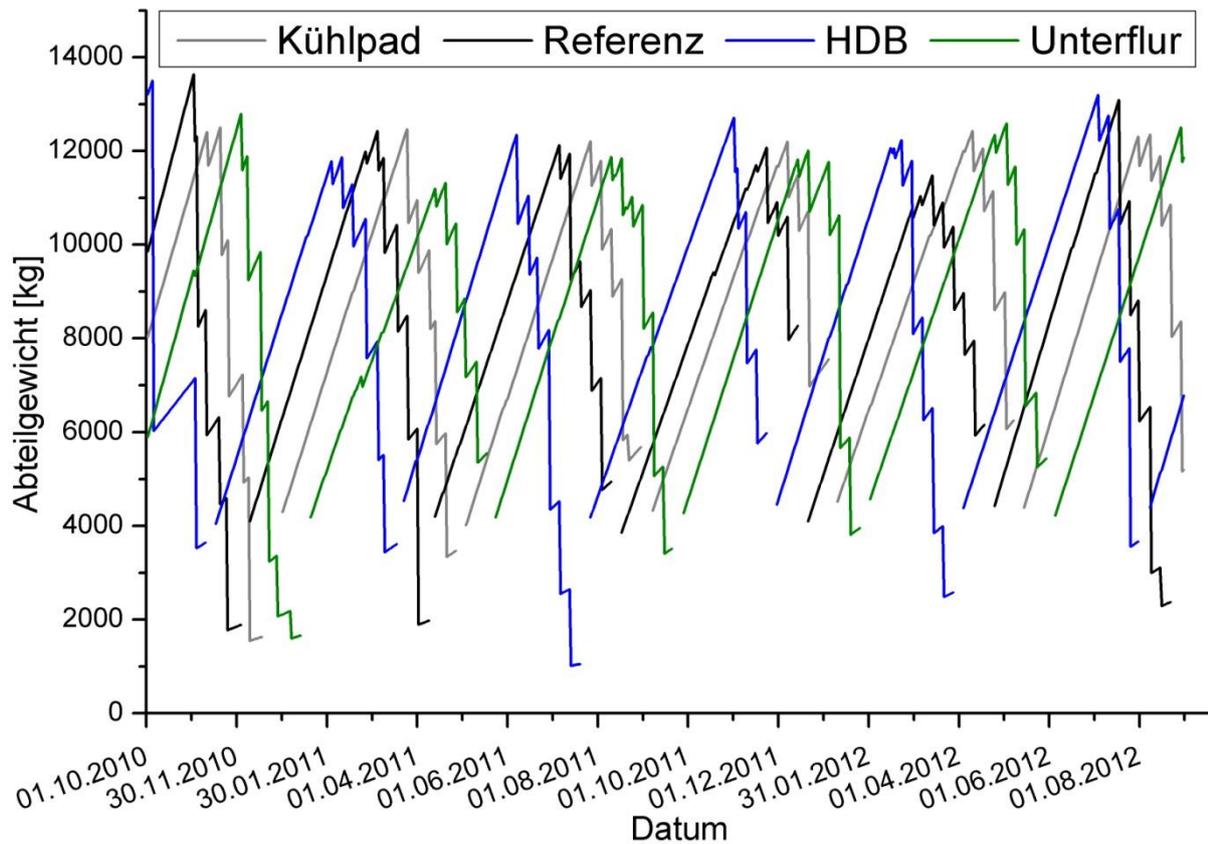


Abb. 12: Verlauf des Abteilgewichtes der jeweiligen Abteile von Okt. 2010 bis Sep. 2012. (HDB= Hochdruckbefeuchtung)

Über den Versuchszeitraum wurden ausschließlich weibliche und kastrierte Tiere eingestellt. Zum Zeitpunkt des Versuchs bestand der Tierbesatz aus Tieren des Hybridzuchtprogrammes BW*241 mal BW*Pietrain Top-Genetik Sperma. In der Abb. 13 sind die Abteile abgebildet. Zusätzlich ist eine detaillierte Abteilbeschreibung der Tab. 6 zu entnehmen. Unterschiede bestehen im Platzangebot pro Tier und der Anzahl der Außenwände.



Abb. 13: (oben) Abteil B1 Kühlpad und Abteil C1 Referenz Baugleich Innenausstattung
(Mitte) Abteil C2 Hochdruckbefeuchtungsabteil, roter Pfeil zeigt HDB-Leitung
(unten) Abteil C3 Unterflurzuluft mit bis zum Ende durchgehendem Versorgungsgang

Tab. 6 Abteilbeschreibung zu Tierzahl und Lüftungssystem

Referenzabteil (C1)	125 Tiere dezentrale Abluft, ein Kamin Ø 65 cm Zuluft über Porendecke 6 Buchten (20-22 Tiere/Bucht) ca. 1,10 m ² /Tier ; 3,48 m ³ /Tier 2 Außenwände
Hochdruckbefeuchtung (C2)	125 Tiere dezentrale Abluft, ein Kamin Ø 65 cm Zuluft über Porendecke 6 Buchten (20-22 Tiere/Bucht) ca. 1,10 m ² /Tier ; 3,48 m ³ /Tier 2 Außenwände
Unterflurzuluft (C3)	125 Tiere dezentrale Abluft, ein Kamin Ø 65 cm Zuluft über Versorgungsgang (Spaltenboden) 6 Buchten (18-22 Tiere/Bucht) ca. 1,00 m ² /Tier ; 3,68 m ³ /Tier 3 Außenwände
Kühlpad (B1)	125 Tiere dezentrale Abluft, ein Kamin Ø 65 cm Zuluft über Porendecke 6 Buchten (20-22 Tiere/Bucht) ca. 1,10 m ² /Tier ; 3,48 m ³ /Tier 2 Außenwände

3.1.1.2 Abluft- und Zuluftführung

Für die Mastabteile an der LSZ Boxberg ergibt sich jeweils nach Berechnung der DIN 18910 nach AEL Heft 17 (VAN DEN WEGHE, 2007) ein Mindestluftvolumenstrom von 900 m³ h⁻¹ (7,1 m³ h⁻¹ TP⁻¹). Für den Sommerzeitraum wurde folglich ein maximaler Luftvolumenstrom von 8300 m³ h⁻¹ (66, m³ h⁻¹ TP⁻¹) berechnet. Dies entspricht einem Lüfterverhältnis von Winter- zu Sommerlüftrate von 1 zu 9,2. Daraus resultiert die unter Tab. 7 aufgelistete Lüftungseinstellungsempfehlung.

Tab. 7: Klimasteuerung an der LSZ Boxberg für die konventionelle Haltung Mast (30 – 120 kg) nach Geißler

Temperaturkurve										
Knickpunkt	Kurve	Solltemp.	Regelbereich		Luft-rate	Luft-rate	Alarm	Alarm Max.	Alarm Pause	Heizungsversatz
			So	Wi						
	[d]	[°C]	[K]		[%]	[%]	[K]	[°C]	[min]	[K]
1	1	25,0	4,5	2,5	10	100	-3,0	35	1	-0,1
2	15	22,5	4,5	2,5	10	100	-3,0	35	1	-0,5
3	60	19,0	4,5	2,5	14	100	-3,0	35	1	-1,0
4	120	18,0	4,5	2,5	16	100	-3,0	35	1	-2,0

Lüftungskurve					
Knickpunkt	Tag	Regelbereich		Mindest. Lüftung	Max. Lüftung
		So	Wi		
	[d]	[K]		[m ³ Tier ⁻¹ h ⁻¹]	[m ³ Tier ⁻¹ h ⁻¹]
1	1	4,5	2	8,0	30
2	15	4,5	2	10	42
3	60	4,5	2	20	85
4	120	4,5	2	20	110

Von insgesamt sechs Mastabteilen wurden vier Abteile für die Untersuchungen umgebaut (siehe Abb. 11). Um eine genaue Aussage über den Volumenstrom der einzelnen Abteile zu erhalten, wurden die Abluftsysteme von einer zentralen Abluft auf eine dezentrale Abluft umgebaut. Der Durchmesser der einzelnen Abluftrohre beträgt 0,73 m und der Endpunkt liegt ca. 7 m über Grund. Zusätzlich sind an jeden Abluftkamin Diffusoren zur Minderung des Gegendrucks montiert. Um eine Unterdrucklüftung zu erzeugen, ist in alle Abluftkammine ein Axialventilator der Firma Ziehl-Abegg des Typs FE 071-4IQ.41.3Z eingebaut. Dieser hat eine Leistung von 13900 m³/h bei einer Nenndrehzahl von 1100 Umdrehungen min⁻¹ und einer Druckerhöhung von 50 Pa (NIETHAMMER, 2000).

In der Abb. 14 zeigt sich die exponentielle Zunahme des Stromverbrauchs dieses Ventilatorentyps bei steigendem Luftvolumenstrom. Durch den versuchsbedingten Umbau der Abluftkammine befand sich der neue Abluftkamin über dem Versorgungsgang (Zuluftbereich) des Unterflurabteils. Nebelproben zeigten, dass es dadurch zu einem Lüftungskurzschluss kommen kann. Das bedeutet, dass die einströmende Frischluft direkt abgesaugt wird. Um bei der Unterflurzuluft diesen Lüftungskurzschluss zu verhindern, wurden am unteren Ende der Abluftkammine von drei Seiten Hartschaumplatten angebracht (siehe Abb. 15).

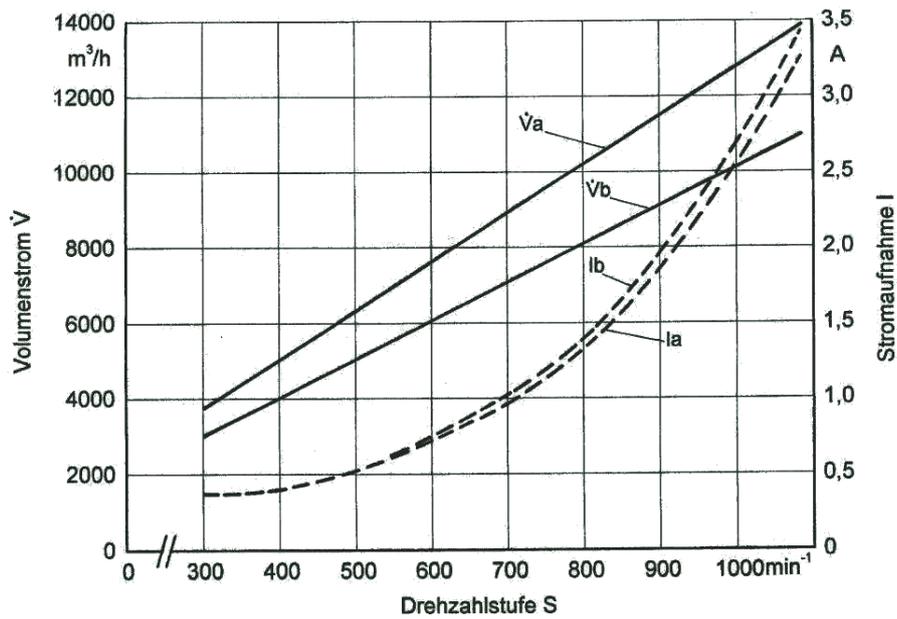


Abb. 14: Volumenstrom und Stromaufnahme bei: 300 bis 1100 U min⁻¹, (a) 50 Pa - und (b) 105 Pa Widerstand (NIEDHAMMER, 2000)
(---- Volumenstrom - - - - Stromaufnahme)



Abb. 15: Abluftkasten zur Verhinderung eines Lüftungskurzschlusses bei der Unterflurluft

Die zwei Seitenteile haben eine Abmessung von 2,5 m x 0,64 m. Zusätzlich befindet sich eine weitere Platte unterhalb des Kamins. Diese Platte wurde vorerst mit den Maßen 1,20 m x 0,92 eingebaut. Damit im Sommer bei hohen Luftraten kein Kurzschluss zustande

kommt, wurde die Bodenplatte 2012 auf die Maße 2,50 m x 0,92 m vergrößert. Die so entstandenen zwei offenen Enden sind Richtung Tierbereich gerichtet. Da dieser Kasten zugleich auch einen Strömungswiderstand darstellt, wurde er auch in die anderen drei Abteile eingebaut, um eine Vergleichbarkeit der Messung in den Versuchsabteilen zu gewährleisten. Da die Frischluft in den übrigen drei Versuchsabteilen über die Porendecke in das Abteil gelangt, wurden hier im Bereich des Abluftkastens die Löcher mit Bauschaum verschlossen.

Die Abteile B1 (Kühlpad), C1 (Referenzabteil) und C2 (Hochdruckbefeuchtung) werden durch eine Porendeckenlüftung mit Frischluft versorgt. Bei dem Abteil B1 wird die Zuluft zunächst durch das Kühlpad an der Südseite des Stalles in einen Vorraum geleitet. Von dort strömt die Luft durch eine Öffnung in den isolierten Dachraum. In diesem verteilt sie sich und fließt durch die Porendecke in das Abteil. Bei den Abteilen C1 und C2 gelangt die Luft über zwei Giebelöffnungen (je 1,2 m²) an der Südseite des Stallgebäudes in den isolierten Dachraum (siehe Abb. 11) und von dort aus in das Abteil.

Die Porendecken bestehen aus einem Polyurethan-Hartschaum und sind in einem Schachbrettmuster angeordnet, bestehend aus perforierten und geschlossenen Platten (vgl. Abb. 16).



Abb. 16: Porendecke im Schachbrettmuster und Heizungsrohre (Deltarohre) zur Erwärmung der einströmenden Luft. (GEIßLER, 2010)

Die Porendecke jedes Abteils besteht aus 104 Abdeckplatten, von denen 50 perforiert sind. Zwei perforierte Platten entfallen, da an diesen Stellen die Abluftkamine ins Abteil ragen. Eine perforierte Platte hat 180 Löcher, die zusammen eine Öffnungsfläche von

0,095 m² ergeben. Auf den Porenplatten befindet sich eine ca. 3 cm dicke Mineralwollschicht. Diese soll zum einen das Abteil dämmen und zum anderen im Winter das Aufsteigen von warmer Luft bzw. das punktuelle zu schnelle Hereinfallen von kalter Luft in das Abteil verhindern.

In das Abteil C3 gelangt die Zuluft durch die Unterflurlüftung (siehe Abb. 17). Hier wird die Luft erwärmt oder abgekühlt, was nachfolgend ausführlicher beschrieben wird. Die Frischluft gelangt über die Öffnungen im Westen und Osten des Stalles in den Unterflurkanal des Bauteils A. Der Querschnitt des Kanals beträgt ca. 5 m². Grund für diesen großen Querschnitt ist die gleichzeitige Versorgung anderer Kanäle mit Frischluft. Von dort aus strömt die Luft in den Unterflurkanal des Bauteils C. Dieser besitzt einen etwas schmaleeren Querschnitt von ca. 3 m². Kurz vor Ende des Kanals gelangt die Luft in das Abteil C3. Unter dem Versorgungsgang, der mit 15% perforierten Spalten ausgelegt ist, befindet sich wiederum ein 0,75 m tiefer und 0,95 m breiter Kanal. Von diesem Kanal steigt die Luft durch die Spalten auf und gelangt zu den Tieren. Mit Hilfe einer Nebelprobe ist diese Strömung in Abb. 18 veranschaulicht. Um zu verhindern, dass zu kalte Luft zu den Tieren gelangt, sind die Buchtentrennwände bis zu einer Höhe von 1,03 m geschlossen.

Im Sommer wird zusätzlich eine Zuluftöffnung an der Ostseite des Stalles (0,75 m x 0,95 m) geöffnet. Diese dient sowohl dem Ausgleich des hohen Volumenstroms im Sommer als auch der Verminderung der Luftgeschwindigkeiten im Versorgungsgangkanal. Die gleichmäßige Verteilung der Luft soll so gewährleistet werden. Im Winter ist diese Zuluftöffnung der Ostseite des Stalles verschlossen. Auch eine der Zuluftöffnungen im Westen bzw. Osten an Bauteil A ist komplett verschlossen, während die jeweils andere zur Hälfte abgedeckt ist. Im Winter 2010/2011 war die Westseite verschlossen und im darauffolgenden Jahr die Ostseite.

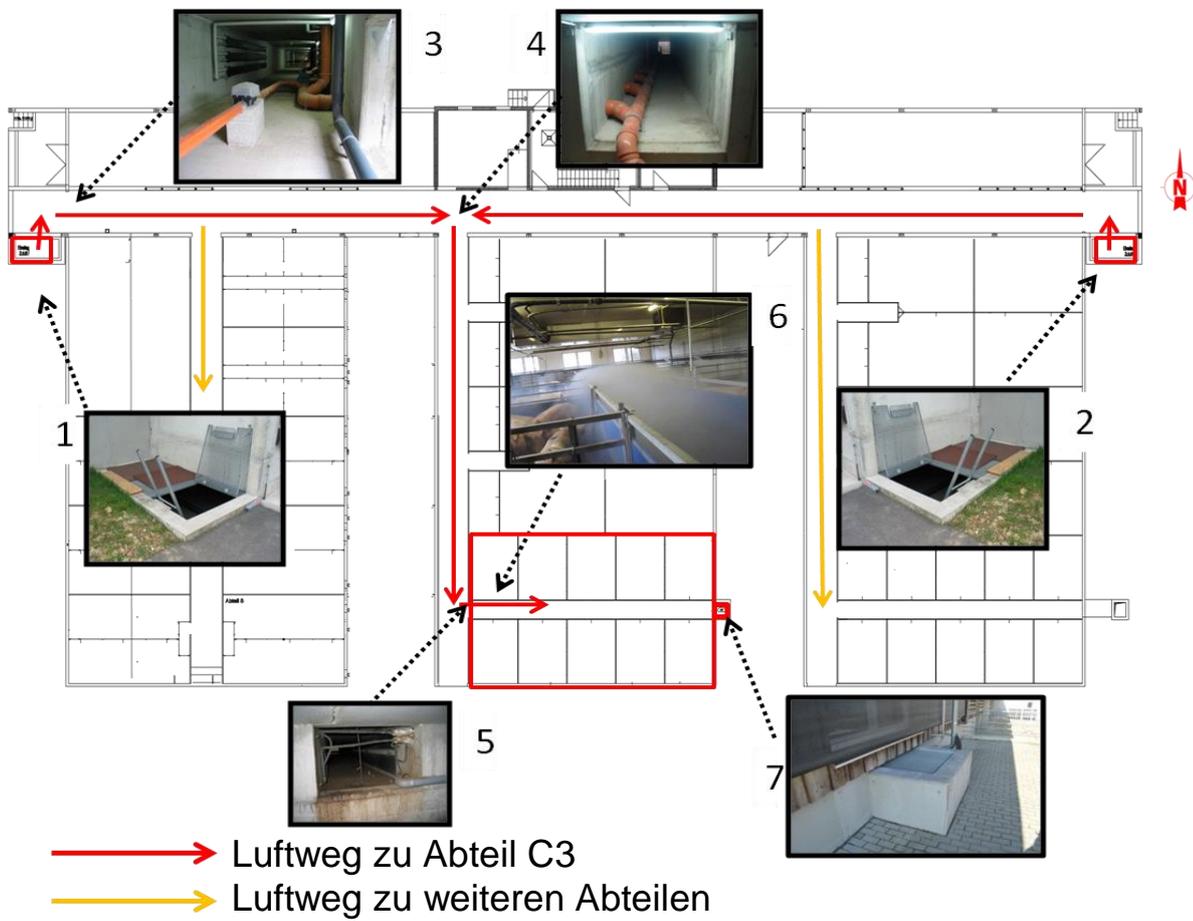


Abb. 17: Luftführung der Unterflurzuluft: (1) & (2) Zuluftöffnungen, (3) Unterflurkanal von Bauteil A, (4) Abzweigung zum Unterflurkanal des Bauteils C, (5) Einlass unter den Zentralgang des Abteils C3, (6) Luftpfeile im Winter in das Abteil C3, (7) zusätzliche Zuluftöffnung für Sommerlüftung



Abb. 18: Luftpfeile im Winter in Abteil C3 (Unterflurzuluft)

3.1.1.3 Technische Beschreibung der Kühlsysteme

Neben den baulichen Maßnahmen, die der Angleichung der Abteile dienten, mussten auch noch die zwei Kühlsysteme installiert werden. Zum einen war dies ein Hochdruck-Vernebelungssystem für Einzelabteile, das von der Firma Big Dutchman gekauft wurde. Dies wurde dann in Eigenarbeit eingebaut. Die Leitungen laufen entlang der Längsseiten des Abteils und sind mit 2x8 Düsen ausgestattet. Die Pumpe selbst ist außerhalb des Abteils angebracht. Die Hochdruckbefeuchtung hatte einen eigenen Temperatur-/ Feuchtefühler, über den sie angesteuert wurde. Befeuchten sollte die Anlage ab einer Abteilstemperatur 3 K über der Solltemperatur und ab einer relativen Luftfeuchte im Abteil unter 40%. Aus Vorversuchen hatte sich ein Intervall von 30 Sekunden Sprühen und 5 Minuten Pause bewährt.

Zum anderen wurde ein Kühlpad an der Südseite des Bauteils B gebaut, wie in Abb. 11 gekennzeichnet. Es wurde von der Firma Schnell gekauft und eingebaut. Zusätzlich wurden zwei miteinander verbundene 1000 l Tanks in den Unterflurkanal gestellt und an den Wasserkreislauf des Kühlpads angeschlossen. Zur Regulation der Wassermenge wurde an einem der Tanks zwei Steuerungsfühler eingebaut, die bei einem gewissen Wasserstand eine größere Menge Wasser zulaufen lassen. Dies war zwingend notwendig, um den Wasserverbrauch genau zu messen. Weiterhin wurde in den Vorraum hinter dem Kühlpad eine Bodenplatte eingelegt, damit die Lüftung von der Unterflur zum Dachraum verschlossen war. Zugleich wurden die zwei Giebelöffnungen an der Südseite verschlossen, sodass die gesamte Luft das Kühlpad passieren musste. Dies wurde auch über den Winterzeitraum bei ausgeschaltetem Kühlpad so belassen. Über diesen Lüftungsweg wird allerdings neben dem Abteil B1 auch das Abteil B2 mit Frischluft versorgt (siehe Abb. 11). Aus diesem Grund musste das Kühlpad auf eine maximale Kühlleistung für 250 Tiere ausgelegt werden. Daraus ergaben sich die Maße für das Kühlpad von 3,6 m x 0,15 m x 2,4 m (Länge x Breite x Höhe). Das Kühlpad wurde über den Außen- und Abteilsensor (Temperatur / relative Feuchte) gesteuert. Im Jahr 2011 schaltete sich das Kühlpad ab einer Außentemperatur von 21°C ein und nach dem Absinken der Außentemperatur auf 19°C wieder aus. Im Jahr 2012 wurde die Einstellung optimiert auf Einschalten des Kühlpads bei 24°C Außentemperatur und Abschalten bei 22°C. Zugleich wurde das Kühlpad bei einer relativen Abteilfeuchte von 80% ausgeschaltet bzw. gar nicht erst eingeschaltet.

Beim Bau des Maststalles war die Unterflurlüftung bereits ein fester Bestandteil, weshalb keine weiteren baulichen Veränderungen nötig waren. Einzige Zusatzmaßnahmen waren

die Zuluftfläche zum Sommer hin zu vergrößern bzw. zum Winter hin zu verkleinern (siehe Abb. 17 Punkte (1), (2) und (7) Einlassöffnungen).

3.1.2 Praxisbetriebe

3.1.2.1 Betrieb A (Erdwärmetauscher)

Der Betrieb A liegt auf einer Höhe von 416 m über Normalnull im Landkreis Schwäbisch Hall in Baden-Württemberg. Temperatur und Niederschlag wurden an der Wetterstation „Renzen-Pfedelb.“ aufgenommen und werden vom LTZ Augustenberg zur Verfügung gestellt. Als Übersicht dienen die letzten vier Jahre (siehe Tab. 8).

Tab. 8: Jahreswerte der Wetterstation "Renzen-Pfedelb." (LTZ AUGUSTENBERG, 2013)

Jahr	Ø Temperatur [°C]	min. Temperatur [°C]	max. Tempera- tur [°C]	Niederschlag [mm]
2009	9,6	-19,7	36,3	641
2010	8,9	-19,0	36,4	712
2011	11,0	-11,9	34,4	598
2012	10,6	-17,7	37,1	661

Der Betrieb unterteilt sich in mehrere Stallungen. Der zu untersuchende Maststall liegt ca. 300 m vom Wohnhaus und den anderen Stallgebäuden entfernt. Dieser wurde im Jahr 1995 in Ost – Westrichtung verlaufend und mit einem Erdwärmetauscher gebaut. Der Erdwärmetauscher besteht aus 162 Rippenrohren, die jeweils 14 m lang sind und einen Durchmesser von 200 mm haben (siehe Abb. 19). Im Jahr 2007 wurde der Stall um vier Abteile erweitert, sodass 14 Abteile entstanden. Gleichzeitig wurden auch zusätzliche Rippenrohre für die neuen Abteile verlegt. Diesen waren im Durchmesser etwas größer, sodass die Anzahl der Rohre reduziert werden konnte. Der Güllebehälter ist befahrbar und befindet sich an der Giebelseite östlich des Stalles. Die Ansaugseite der Zuluftrippenrohren, die durch das Erdreich zum Stall führen, befindet sich auf der Südseite des Stalles. Der größte Teil des Stalles sowie die Inneneinrichtung wurde in Eigenarbeit erstellt. Die zunächst eingebaute Zuluftheizung wurde nach einigen Jahren entfernt, da sie nicht benötigt wurde. Aufgeheizt wird das Abteil über eine Fußbodenheizung im Mittelteil (Liegefläche) der Bucht.



Abb. 19: (oben links) Erdwärmetauscher-Betrieb (oben rechts) Ansaugseite Rippenrohre
 (unten links) Eingang der Rippenrohre in den Keller des Stalles
 (unten rechts) Abteil mit vier Buchten, Zuluft durch Spaltenboden des Zentralganges

Insgesamt 13 der 14 Abteile sind 7,25 m lang und 7,86 m breit. Sie bieten Raum für 72 Mastplätze, die mit teilperforiertem Boden ausgestattet sind. Die Höhe der Abteile nimmt Richtung Außenwand von 3,43 m auf 2,83 m ab. Das 14. Abteil ist nur halb so groß und hat 36 Mastplätze. Ein Abteil ist in sechs Buchten á zwölf Tiere aufgeteilt. Zwischen den Buchten befindet sich ein Breifutterautomat. Aufgrund eigener Ferkelerzeugung besteht in diesem Betrieb die Möglichkeit, die Tiere bis zu einem Gewicht von ca. 40 kg einzustallen.

Die zu dem Versuch gehörige Messtechnik wurde in ein Abteil auf der Nordseite des Stalles eingebaut.

Das Grundprinzip eines Erdwärmetauschers wurde unter Punkt 2.4.4 erläutert und gilt auch für diesen Betrieb. Eine Besonderheit ist die Aufteilung des dezentralen Abluftschachtes im Abteil (siehe Abb. 20). An der Unterseite des Abluftkamins befindet sich eine Klappe, die über den Luftvolumenstrom bzw. die Schwerkraft gesteuert wird. Bei hohen

Luftraten reichen die zwei Seitenarme, die aus dem Abluftschacht ins Abteil zeigen, nicht aus. Durch den Sog des Ventilators wird die Klappe an der Unterseite des Abluftschachtes aufgedrückt. Somit befindet sich ein Großteil des Abzugs über dem Mittelgang, über den auch die Frischluft ins Abteil gelangt. Hierbei kann es zu einem Kurzschluss der Lüftung kommen. Nebelproben haben jedoch gezeigt, dass dies nur in wenigen Fällen zutrifft. Weiterhin besitzt der Stall einen Stallklimaregler für die Lüftung, an welchem die einzelnen Abteillüfter individuell eingestellt werden können. Der Regler wird jeden Morgen von dem Landwirt manuell eingestellt.

Die errechnete Lüftungsrate nach AEL Heft 17 (VAN DEN WEGHE et al., 2007) sollte im Winter mindestens bei $530 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ und Abteil bzw. $7,3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ und Tierplatz liegen. Im Sommer soll eine maximale Luftrate von $4200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ je Abteil bzw. $57,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ je Tierplatz erreicht werden.



Abb. 20: Dezentraler Abluftschacht mit an der Unterseite befindlicher Schwerkraftklappe am Betrieb A (Erdwärmetauscher).

3.1.2.2 Betrieb B (Unterflurzuluffführung)

Der Betrieb B befindet sich 416 m über Normalnull im Landkreis Heilbronn in Baden-Württemberg. Auch hier gelten die Wetterdaten der bereits erwähnten Wetterstation von Tab. 8. Auf dem Betriebsgelände gibt es zwei Mastställe, wovon einer mit einer Unterflurzuluffführung ausgestattet ist. Bei dieser Zuluffführung handelt es sich um eine Umbaulösung aus einem früheren Zuluffsystem. Dieses System wurde bereits von VAN CAENEGEM (2007) beschrieben und wird noch heute von der Firma I-TEK (2013) angeboten. Der Grundaufbau entspricht der Unterflurlüftung. Die Luft wird durch Zuluffgänge

unter den Kontrollgang geleitet. Hier ist im Gegensatz zur Unterflurlüftung der Kontrollgang mit einer Betonplatte abgedeckt. Die Luft wird durch einzelne Röhren, die in dem alten Stallabteil ca. 80 cm senkrecht nach oben ragten, ins Abteil gesaugt. Dabei können besonders im Sommer hohe Luftgeschwindigkeiten entstehen, da die Öffnungsfläche sehr klein ist. Im Eigenbau wurde die Zuluftführung im Jahr 2009/10 umgebaut (Abb. 21). Im Kontrollgang wurde die geschlossene Bodenplatte entfernt und durch einen Spaltenboden ersetzt. Das Versuchsabteil ist 22 m lang und 6,64 m breit, die Höhe des Abteils beträgt 2,20 m. Die im Abteil befindlichen 6 Buchten bieten Platz für 90 Tiere, die über eine Flüssigfütterung versorgt werden. Die Quertröge befinden sich zwischen den Buchten. Das Einstallgewicht der Tiere beträgt ca. 25 kg, ausgestellt werden die Tiere bei einem Gewicht zwischen 115 kg und 120 kg. Das Versuchsabteil befindet sich auf der Ostseite des Stallgebäudes.



Abb. 21: (links) Abteil mit Unterflurzuluft über Röhren ins Abteil (roter Pfeil)
 (Mitte) Umbau, Entfernen des geschlossenen Zentralgangbodens
 (rechts) Unterflurzuluft durch Zentralgang mit Spaltenboden

Da es sich um ein Altgebäude handelt, in das nachträglich das Mastabteil eingebaut wurde, gibt es einige Sonderlösungen bei der Luftführung. Die Zuluft wird von außen in einen Vorraum gesogen, der mit einem Brettverschluss und zu einer Seite mit einem Scheunentor verschlossen ist. Aus diesem Vorraum gelangt die Luft in einen Unterflurkanal, der 1,5 m lang ist, bevor er in den Kanal des Zentralganges übergeht (Abb. 22). Auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich eine zweite Zuluftöffnung ohne einen zusätzlichen Vorraum, durch die die Luft ohne zusätzlichen Widerstand in das Abteil gelangt. Im Abteil befinden sich zwei Abluftschächte, die in einen Kanal im Dachraum münden. Von diesem führen zwei Abluftkamine aus dem Stall hinaus, die über einen Lüftungsregler angesteuert werden.



Abb. 22: (rechts) Ansaugen der Frischluft durch das Tor
 (Mitte) Eingang zum Unterflurkanal
 (rechts) Unterflurkanal unter Zentralkang mit Temperatur-/ Feuchtefühler. Am Ende des Kanals ist der zweite Lufteinlass zu erkennen.

Für Betrieb B (Unterflur) wurde eine Lüftungsrate nach AEL Heft 17 (VAN DEN WEGHE et al., 2007) für den Winter von mindestens $660 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ und Abteil bzw. $7,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ und Tierplatz errechnet. Im Sommer soll eine maximale Lüfrate von $6000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ und Abteil bzw. $66,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ und Tierplatz erreicht werden.

3.1.2.3 Betrieb C (Hochdruckbefeuchtung)

Der dritte Betrieb befindet sich im Alb-Donau-Kreis in Baden-Württemberg auf einer Höhe von 628 m über Normalnull. An diesem Standort ist die Jahresdurchschnittstemperatur geringer als bei den obigen Betrieben. Gleichzeitig fällt mehr Niederschlag, wie aus folgender Tab. 9 ersichtlich ist.

Tab. 9: Jahreswerte der Wetterstation "Bremelau". (LTZ AUGUSTENBERG,2013)

Jahr	Ø Temperatur [°C]	min. Temperatur [°C]	max. Temperatur [°C]	Niederschlag [mm]
2009	7,8	-21,5	31,2	1170
2010	6,7	-14,9	31,7	1050
2011	8,4	-12,4	31,5	970
2012	8,0	-18,3	32,1	828

Der Betrieb besteht aus mehreren Stallungen, wobei der Mastschweine Stall ca. 270 m südlich vom Rest des Betriebes liegt. Der Stall wurde im Jahr 2003 in Ost – Westrichtung

zusammen mit einer befahrbaren Güllegrube gebaut. Im Jahr 2009 wurde eine Biogasanlage in direkter Nähe zum Stall mit den dazugehörigen Fahrsilos ergänzt. Insgesamt besteht der Stall aus vier Abteilen, die jeweils 11,46 m breit und 25,10 m lang sind. Im Untersuchungsabteil ist die Länge auf einer Buchtenseite etwas kürzer (22,49 m), da hier die Wand der Hygieneschleuse in das Abteil hineinragt. Das Abteil besteht aus elf Buchten. Diese sind aufgeteilt in acht Großbuchten mit 34 Tierplätzen (Abb. 23) und drei Kleinbuchten mit 17 Tierplätzen. Eine Bucht dient als Krankenbucht, sodass das Abteil 306 Tierplätze umfasst. Die Tiere in den Großbuchten werden mittels Breifutterautomaten versorgt. Bei den Kleinbuchten befindet sich der Futterautomat zwischen den Buchten. Die Ferkel werden bei einem Gewicht von 25 kg bis 30 kg eingestallt und bis zu einem Gewicht von ca. 115 kg gemästet. Das Untersuchungsabteil befand sich auf der Nordseite des Stalles.

Zur Kühlung ist der Stall mit einer Hochdruckbefeuchtung ausgestattet, die alle vier Abteile versorgt. Diese schaltet sich ab einer Abteilstemperatur von 30°C für ca. eine Minute ein und nach ca. 45 Sekunden wieder aus. Im Winter ist die Anlage ausgeschaltet. Der Stall hat eine Strahllüftung. Die Zuluft wird zunächst in den nicht isolierten Dachraum gezogen, um dann über einzelne Klappenöffnungen in das Abteil zu gelangen. Aufgrund der Größe des Abteils benötigt dieses vier dezentrale Abluftschächte, von denen nur einer einen geregelten Ventilator besitzt. Über einen Lüftungsregler werden die Ventilatoren ein- bzw. abgeschaltet.

Die errechnete Lüftungsrate nach AEL Heft 17 (VAN DEN WEGHE et al., 2007) sollte im Winter mindestens bei 2140 m³ h⁻¹ und Abteil bzw. 7,0 m³ h⁻¹ und Tierplatz liegen. Im Sommer soll eine maximale Lüfrate von 21600 m³ h⁻¹ und Abteil bzw. 70,3 m³ h⁻¹ und Tierplatz erreicht werden.



Abb. 23: (oben) Stall des Praxisbetriebs C (Hochdruckbefeuchtung)
 (unten links) Abteil mit an der linken und rechten Wand entlanglaufenden Hochdruckbefeuchtungsleitungen + Düsen
 (unten rechts) Bucht für 36 Tiere mit Breifutterautomat

3.2 Untersuchungszeitraum

Der Messzeitraum in den Stallungen der LSZ Boxberg betrug 23 Monate und startete am 01. Oktober 2010. Zu diesem Zeitpunkt waren jedoch nicht alle Messgeräte vorhanden, da das Schadgasmessgerät fehlte. Dieses wurde 6 Monate später in Betrieb genommen, so dass ab dem 01. April 2011 mit der gesamten Datenerfassung begonnen werden konnte. Auf den zwei Praxisbetrieben, die auf Erdwärmenutzung basieren, wurde mit den Messungen Ende 2011 begonnen. Der dritte Praxisbetrieb kam Anfang 2012 hinzu. Die Messungen auf den Praxisbetrieben liefen bis Ende August 2012 und an der LSZ Boxberg bis Ende September 2012. Bei den Verbrauchsdaten von Strom und Wasser liefen die Messungen bis Ende Dezember 2012. Der Schwerpunkt der Messungen lag auf den Untersuchungsställen der LSZ Boxberg, da hier die beste Vergleichbarkeit und größtmögliche Datenerfassung gegeben war. Ein Multigasmonitor der Firma LumaSense wurde aus diesem Grund fest an der LSZ Boxberg installiert, wohingegen ein zweiter Multigasmonitor in einem festen Turnus zwischen den Praxisbetrieben wechselte. Dieser Turnus wurde bei einem längeren Ausfall (13.06.2011 bis 05.07.2011) des fest installierten Multigasmonitors

der LSZ Boxberg unterbrochen, da dieser daraufhin an der LSZ Boxberg eingesetzt wurde. Für diesen Zeitraum stehen keine Schadgasmessungen der Praxisbetriebe zur Verfügung. Weiterhin kam es auch bei den anderen Messwerterfassungssystemen gelegentlich zu Ausfällen. Die Messwerterfassung an der LSZ Boxberg ist am kontinuierlichsten verlaufen. Besonders bei den Betrieben A und C kam es immer wieder zu technischen Ausfällen. Die folgende Tab. 10 zeigt den Messzeitraum ohne die technischen Ausfälle.

Tab. 10: Messzeitraum (Betrieb A = Erdwärmetauscher; Betrieb B = Unterflurzuluft; Betrieb C = Hochdruckbefeuchtung)

		Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
2010	Boxberg												
	Betrieb A												
	Betrieb B												
	Betrieb C												
2011	Boxberg												
	Betrieb A												
	Betrieb B												
	Betrieb C												
2012	Boxberg												
	Betrieb A												
	Betrieb B												
	Betrieb C												

In dem Messzeitraum kam es wiederholt zu Ausfällen der Messtechnik bzw. zur Löschung von Messdaten speziell der Stallklima- und Schadgaswerte innerhalb des Zeitraums, in dem das jeweilige Abteil leer war. Als vollständiger Messtag zählen alle Tage, an denen die für die Auswertung relevanten Messwerte vorhanden waren (Tab. 11). Beispielsweise war ein Ausfall der Messtechnik in einer Sommernacht nicht von Bedeutung, wenn die Auswertung nur für eine Außentemperatur größer 22°C gemacht wurde, vorausgesetzt, diese Temperatur wurde nachts nicht erreicht. In der Tab. 11 konnten nicht alle Verknüpfungen der Messwerterfassungssysteme miteinander berücksichtigt werden, sodass die Anzahl an plausiblen Messtagen je nach Fragestellung noch etwas geringer sein konnte.

Tab. 11: Anzahl der Messtage und davon die Anzahl von Tagen mit plausiblen Messwerten im Untersuchungszeitraum für die drei Messwerterfassungssysteme. (HDB = Hochdruckbefeuchtung; EWT = Erdwärmetauscher)

			Stallklimawerte	Verbrauchsdaten	Schadgasmessung
			Anzahl Messtage [d] / Anzahl Tage mit verwertbaren Messwerten [d]		
2010	Boxberg	Kühlpad	92 / 78	80 / 72	-
		Referenz	92 / 86	80 / 72	-
		HDB	92 / 86	80 / 72	-
		Unterflur	92 / 92	80 / 72	-
2011	Boxberg	Kühlpad	365 / 347	366 / 363	244 / 212
		Referenz	365 / 344	366 / 363	245 / 206
		HDB	364 / 342	366 / 363	244 / 200
		Unterflur	365 / 340	366 / 363	244 / 205
	Praxisbetrieb	A, EWT	183 / 84	37 / 37	4 / 2
		B, Unterflur	186 / 52	-	9 / 9
		C, HDB	61 / 53	-	-
2012	Boxberg	Kühlpad	272 / 237	366 / 364	214 / 184
		Referenz	274 / 222	366 / 364	216 / 175
		HDB	274 / 255	366 / 364	214 / 186
		Unterflur	274 / 255	366 / 364	215 / 185
	Praxisbetrieb	A, EWT	257 / 247	365 / 262	90 / 38
		B, Unterflur	245 / 120	75 / 75	63 / 42
C, HDB		241 / 152	140 / 28	44 / 44	
2011 + 2012	Boxberg	Kühlpad	642 / 584	734 / 727	489 / 396
		Referenz	636 / 566	734 / 727	488 / 381
		HDB	642 / 597	734 / 727	488 / 386
		Unterflur	640 / 595	734 / 727	488 / 390
	Praxisbetrieb	A, EWT	424 / 331	302 / 299	95 / 40
		B, Unterflur	409 / 172	75 / 75	72 / 51
		C, HDB	258 / 152	140 / 28	44 / 44

3.3 Messtechnik

Die Messwerterfassung an der LSZ Boxberg stammt von drei unterschiedlichen Herstellern. Auf den Praxisbetrieben wurden zusätzlich individuelle Sonderlösungen benötigt.

3.3.1 Messtechnik an der LSZ Boxberg

3.3.1.1 Technische Angaben zur Messwerterfassung und Sensoren

Alle erfassten Messwerte wurden zu einem Zentralrechner geleitet. Auf diesem wurden sie abgespeichert, in die jeweiligen passenden Datenformate umgewandelt und dann zu einer Datenbank weitergeleitet. Abb. 24 zeigt den schematischen Aufbau der Messwerterfassung an der LSZ Boxberg.

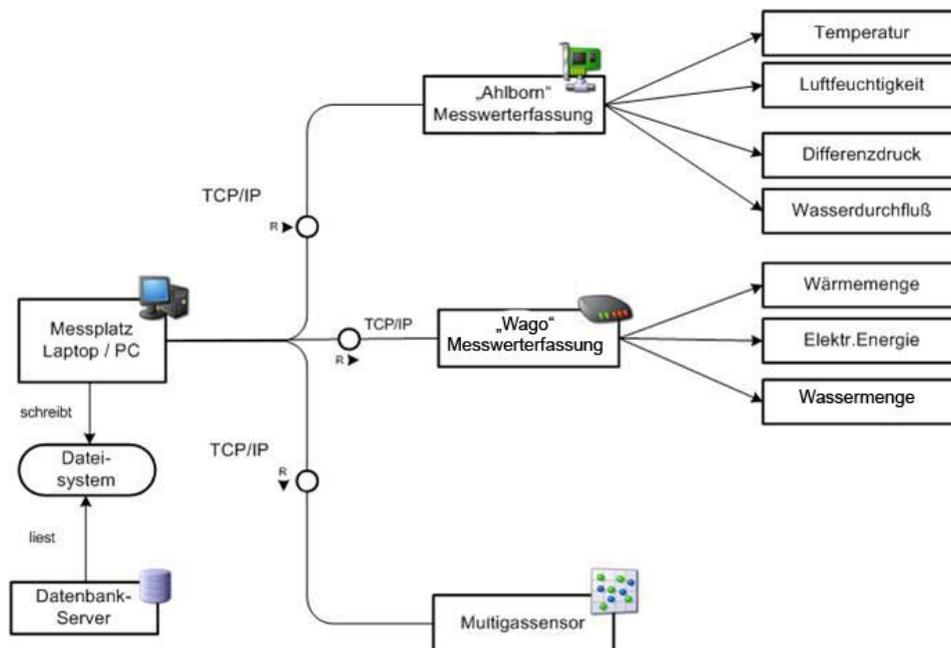


Abb. 24: Schematische Darstellung der Messwerterfassung an der LSZ Boxberg.

Für die Klimaerfassung wurden die Messwerterfassung und die dazugehörigen Sensoren von der Firma **Ahlborn** gekauft. Diese sind mit ihrer Anzahl sowie der Typbezeichnung und dem Messbereich in Tab. 12 aufgelistet. Besonderer Wert wurde auf die Rückverfolgbarkeit der Temperaturveränderung der Luft gelegt, welche von außen in das Abteil gelangt. Der Axial-Turbinen-Durchflussmesser des Typs FVA915VTHK wurde zur Wasserverbrauchsmessung des Kühlpads eingebaut. In Vorversuchen hatte sich gezeigt, dass dieser Durchflussmesser nicht für die Wasserverbrauchsmessungen der Tiere geeignet war, weshalb dort auf die im Folgenden beschriebenen Wasserzähler zurückgegriffen wurde.

Tab. 12: Sensoren der Messwerterfassung der Firma Ahlborn

Messgröße	Einheit	Anzahl	Messbereich / Messgenauigkeit	Sensorbezeichnung
Lufttemperatur / relative Luftfeuchte	°C / %	17	Messbereich: -20 – 80°C Genauigkeit: ± 0,4 K / Messbereich: 0 – 100% r.F. Genauigkeit: ± 1,8% r.F. im Bereich 20 -80% r.F. bei Nenntemperatur	Digitaler Feuchte/ Temperaturfühler, Typ FHAD46x (Ahlborn GmbH)
Außenlufttemperatur / - relative Luftfeuchte	°C / %	1	Messbereich: -20 – 80°C Genauigkeit: ± 0,4 K / Messbereich: 0 – 100% r.F. Genauigkeit: ± 1,8% r.F. im Bereich 20 -80% r.F. bei Nenntemperatur	Digitaler Feuchte/ Temperaturfühler, Typ FHAD46AG (Ahlborn GmbH)
Strömungsgeschwindigkeit	m/s	10	Messbereich: 0,06 - 5 m/s Genauigkeit: ± (0,02 m/s + 3% des Messwertes)	Strömungssensor Thermoanemometer, Typ SS20.500 (Schmidt Technology GmbH)
Differenzdruck	Pa	9	Messbereich: 0 – 100 Pa Linearität: ± 0,5 Pa Hysterese ± 0,1 Pa Temperaturdrift 0,09 Pa/K (23°C Nenntemperatur)	Druckmessumformer, Typ DPS (Ahlborn GmbH)
Volumenstrom	m³/h	7	Messbereich: 800 - 16000 m³/h Genauigkeit: k.A.	Messventilator 730 (Reventa GmbH & Co KG)
Wasserverbrauch	l	1	Messbereich: 2 – 40 l/min Genauigkeit: ± 1% vom Endwert	

Über das **WAGO** Ethernet StarterKit 2I/O System 750 wurden mehrere unterschiedliche Zähler zusammengeführt. Als besonders wichtig erachtet wurden die Erfassung des Stromverbrauchs der Ventilatoren, die Erfassung des Wärmemengenverbrauchs der Heizung und der Wasserverbrauch der Hochdruckbefeuchtung. Um festzustellen, über welchen Zeitraum die Abteiltüren offenstanden, wurden Türkontakte eingebaut. Die genaue Anzahl und Beschreibung der Sensoren ist in der Tab. 13 dargestellt.

Tab. 13: An die Messwerterfassung der Firma Wago angeschlossenen Messsensoren.

Messgröße	Einheit	Anzahl	Messbereich / Messgenauigkeit	Sensorbezeichnung
Strom	kWh	14	Messbereich: Spannung 3 x 230/400 V Strom 10/65 A Genauigkeit: Frequenz 50 Hz $\pm 10\%$	Hutschienen Wechselstromzähler mit Impulsausgang (KDK Dornscheid GmbH)
Wärmemenge	kWh	8	Messbereich: 20 – 90°C	Wärmezähler Typ Integral MK MaXX (Allmess)
Wasserverbrauch	l	5	Messbereich: Wassertemperatur bis 30°C	Aufputzzähler, (Zenner)
Türkontakt		4		Positionsschalter (Eaton)

Die dritte Messeinheit der Firma LumaSense dient der Schadgasmessung. Mit dem **Multigasmonitor 1412** und dem dazugehörigen **Multiplexer 1309** können die Gase Kohlendioxid (CO₂), Ammoniak (NH₃) und Methan (CH₄) von maximal 12 Messstellen gemessen werden. Das Datenblatt zu der Messeinheit ist in Tab. 14 aufgeführt.

Tab. 14: Ausgewählte technische Daten und Kennwerte des Multigasmonitors 1412 (LUMASENSE TECHNOLOGIES A/S, 2007)

Parameter	Wert
Gesamtes internes Volumen	60 cm ³
Durchflussmenge beim Spülen der Messkammer	5 cm ³ /s
Durchflussmenge beim Spülen des Messschlauches	30 cm ³ /s
Vibrationsempfindlichkeit	Vibrationen mit einer Frequenz von 20 Hz können die Messung stören
Akustische Empfindlichkeit	Kein Einfluss von äußerem Schall auf die Messung
Messbereich	10 ⁴ x Detektionsgrenze bei 1-Punkt-Kalibration 10 ⁵ x Detektionsgrenze bei 2-Punkt-Kalibration
Nullpunktdrift	$\pm 1\%$ der Detektionsgrenze in 3 Monaten (siehe dazu STEGBAUER, 1996)
Temperatureinfluss	$\pm 10\%$ der Detektionsgrenze/°C
Druckeinfluss	$\pm 0,5\%$ der Detektionsgrenze/hPa
Wiederholbarkeit	1% der Detektionsgrenze
Messbereichsdrift	$\pm 2,5\%$ des gemessenen Wertes in 3 Monaten
Temperatureinfluss	0,3% des gemessenen Wertes/°C
Druckeinfluss	-0,01% des gemessenen Wertes/hPa
Referenzbedingungen für alle hier angegebenen Werte: 20°C, 1013 hPa, Rel. Luftfeuchte: 60%, Gaskonzentration: 100 x Detektionsgrenze, S.I.T.: 5 s	

Der Multigasmonitor befand sich in der Messkammer der LSZ Boxberg, die im Bauteil A eingerichtet wurde. Hierfür mussten Teflonschläuche (4mm Außen- x 3mm Innendurchmesser) von den Abteilen und deren Zu- und Abluftkanälen zur Messkammer gelegt wer-

den. Diese Schläuche wurden zusammen mit einem Heizbegleitkabel verlegt, damit sich in der kühleren Jahreszeit die Luft auf dem Weg zur Messkammer nicht abkühlt und kein Kondenswasser in den Schläuchen entsteht. Die Schlauchlängen lagen zwischen 17 m (Abteil B1) und 58 m (Abteil C3). Am Ende eines jeden Schlauches wurde ein Filter aus Teflon (Filterstärke 4,5 µm) angebracht.

Die mit dem Multigasmonitor gemessenen Gase können nicht nur auf ihrem Filter ein Signal erzeugen, sondern auch auf anderen, sofern sie in dessen Bereich eine Absorptionslinie aufweisen (Tab. 15).

In Kapitel 3.4.4 wird die Kalibration des Multigasmonitors beschrieben.

Tab. 15: Übersicht über die Kreuzinterferenzen der mit dem Multigasmonitor 1412 gemessenen Gase. (LUMASENSE TECHNOLOGIES A/S, 2009)

Gas (Filter)	Beeinflusst durch Kreuzinterferenz von
NH ₃ (UA 0973)	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄
CO ₂ (UA 0983)	NH ₃ , N ₂ O, CH ₄
CH ₄ (UA 0969)	NH ₃ , N ₂ O

3.3.1.2 Anordnung der Messplätze

Der Grundaufbau der Messsensorenplätze war in allen Abteilen gleich. So wurde überall die Zuluft, Abteilluft und Abluft gemessen. Folgende Abbildung zeigt die Lage aller Sensoren. An einigen Stellen befindet sich die Sensortechnik im Dachraum, während der eigentliche Fühler im Abteil hängt.

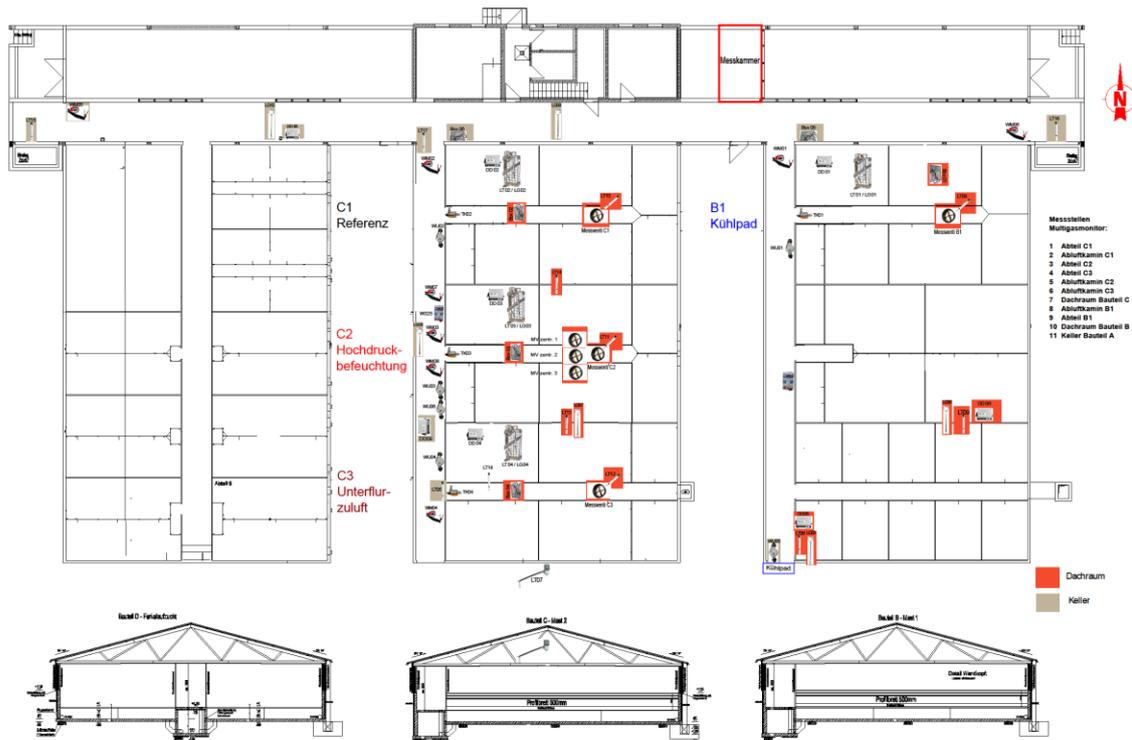


Abb. 25: Lage der Sensoren im Maststall an der LSZ Boxberg.

Der Außentemperaturfühler befindet sich an der Giebelseite des Bauteils C in einer Höhe von 3,20 m. In dieser Höhe strömt die Luft in den Dachraum. Der Sensor hat einen Abstand von einem Meter zur Gebäudewand, wodurch eine Beeinflussung des Sensors durch die Wand verhindert werden soll. Für das Versuchsabteil mit der Unterflurzuluft wurde jeweils am West- und Osteingang der Unterflurkanäle die Temperatur und relative Luftfeuchte gemessen. Da an diesen Punkten keine Einflüsse durch Sonne und Regen zu erwarten waren, wurden Sensoren ohne ein Allwetterschutzgehäuse verwendet. Auf dem Weg durch die Kanäle zu den einzelnen Abteilen wurde je nach Länge eine unterschiedliche Anzahl an Sensoren angebracht. Ziel war es, eine möglichst genaue Auflösung der Temperatur- und relativen Luftfeuchteveränderung zu bekommen, außerdem sollten die Veränderung von Luftgeschwindigkeit und Differenzdruck aufgenommen werden. Zur späteren Emissionsberechnung musste auch der Schadgasgehalt der Zuluft gemessen werden. Im Tierbereich wurden die Sensoren zur Messung der Temperatur, Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit und Schadgaskonzentration in einer Höhe von ca. 75 cm über dem Spaltboden angebracht. Um die Sensoren vor den Tieren zu schützen, wurden sie in einem selbstgebauten Käfig untergebracht (siehe Abb. 26). Um die Strömungsbewegungen der

Luft möglichst wenig zu beeinflussen, wurde eine geringe Anzahl an Gitterstäben angestrebt.



Abb. 26 Messsensoren im Schutzkäfig

In den Abluftkaminen befanden sich der Messventilator sowie ein Temperatur-/ Feuchtemesser und ein Schlauch zur Messung der Schadgase. Der Kalibration des Messventilators widmet sich Kapitel 3.4.3.1 ausführlicher.

3.3.2 Messtechnik an den Praxisbetrieben

Auf den Praxisbetrieben mit dem Erdwärmetauscher und der Unterflurzuluft wurden Energiemonitore / Datenlogger des Typs EM 1010 PC eingebaut. Diese stammten von der Firma ELV Elektronik AG. Der Betrieb mit der Hochdruckbefeuchtung wurde mit dem Wago Ethernet StarterKit ausgestattet und erhielt somit die gleichen Stromzähler wie die LSZ Boxberg. Es wurden keine Wasserzähler an den Tränken eingebaut. Auch wurde auf die hohe Zahl an Strömungssensoren in den Zuluftwegen verzichtet, es wurde lediglich jeweils ein Strömungssensor im Tierbereich eingebaut. Nachfolgende Übersicht zeigt, wie viele Sensoren auf den jeweiligen Praxisbetrieben eingebaut wurden.

Tab. 16: Anzahl und Art der Sensoren auf den drei Praxisbetrieben. (Betrieb A = Erdwärmetauscher; Betrieb B = Unterflurzuluft; Betrieb C = Hochdruckbefeuchtung)

Messgröße	Einheit	Betrieb	Anzahl	Messbereich / Messgenauigkeit	Sensorbezeichnung
Lufttemperatur / relative Luftfeuchte	°C / %	A	4	Messbereich: -20 – 80°C Genauigkeit: ± 0,4 K / Messbereich: 0 – 100% r.F. Genauigkeit: ± 1,8% r.F. im Bereich 20 -80% r.F. bei Nenntemperatur	Digitaler Feuchte/ Temperaturfühler, Typ FHAD46x (Ahlborn GmbH)
		B	4		
		C	5		
Strömungsgeschwindigkeit	m/s	A	1	Messbereich: 0,06 - 5 m/s Genauigkeit: ± (0,02 m/s + 3% des Messwertes)	Strömungssensor Thermoanemometer, Typ SS20.500 (Schmidt Technology GmbH)
		B	1		
		C	1		
Differenzdruck	Pa	A	2	Messbereich: 0 – 100 Pa Linearität: ± 0,5 Pa Hysterese ± 0,1 Pa Temperaturdrift 0,09 Pa/K (23°C Nenntemperatur)	Druckmessumformer, Typ DPS (Ahlborn GmbH)
		B	1		
		C	1		
Volumenstrom	m³/h	A	1	Messbereich: 800 - 16000 m³/h Genauigkeit: k.A.	Messventilator 730 (Reventa GmbH & Co KG)
		B	2		
		C	4		
Wasserverbrauch	l	A	0	Messbereich: Wassertemperatur bis 30°C	Aufputzzähler, (Zenner)
		B	0		
		C	1		
Strom	kWh	A	1	Messbereich: 1 W – 4000 W	Energiamonitor / Datenlogger Typ EM 1010 PC (ELV Elektronik AG)
		B	1		
Strom	kWh	C	1	Messbereich: Spannung 3 x 230/400 V Strom 10/65 A Genauigkeit: Frequenz 50 Hz ± 10%	Hutschienen Wechselstromzähler mit Impulsausgang (KDK Dornscheid GmbH)

Zur Schadgasmessung wurde ebenfalls ein Multigasmonitor 1412 zusammen mit einem Multiplexer 1309 eingesetzt. Dieser stammte aus dem Fachgebiet Verfahrenstechnik der Tierhaltung der Universität Hohenheim und konnte die gleichen Gase wie das Gerät in Boxberg messen. In Voruntersuchungen zeigte sich, dass trotz gleicher Bau- und Funktionsweise so wie gleicher Kalibration die Geräte nicht vergleichbar sind. Die mittlere Abweichung lag bei 22% für NH₃, 5% für CO₂ und 8% für CH₄. Auf ein Austauschen der Geräte wurde daher soweit es möglich war verzichtet.

Die Sensoren der Praxisbetriebe wurden ähnlich der Sensoren der LSZ Boxberg installiert. Es wurde die Zu- und Außenluft sowie die Abteilwerte gemessen, die auch an der LSZ Boxberg gemessen wurden. Die Sensoren wurden auch hier in einem Schutzkäfig im Tierbereich angebracht. Der letzte Messpunkt war die Abluft. Aufgrund der Größe des Abteils des Betriebes C wurden zwei Temperatur-/ Feuchtefühler und zwei Probeentnahmestellen für die Schadgasbestimmung eingebaut.

3.4 Überwachung und Kalibration der Messtechnik

3.4.1 Boxberg

Auf dem Computer des Messraums der LSZ Boxberg, an dem die Messtechnik angeschlossen war, konnten über Fernzugriff alle Systeme überprüft werden. Zudem war eine Versuchstechnikerin vor Ort, um die Datenaufzeichnung zu überwachen und defekte Sensoren auszutauschen. Einmal pro Woche wurden die Filter der Teflonschläuche zum Multigasmonitor vom Abteil C3 (Unterflurzuluft) gewechselt. In diesem Abteil waren die Schadgasmesspunkte am weitesten vom Messgerät entfernt. Kleine Verschmutzungen der Filter an den Ansaugpunkten führten bereits zu einer Fehlermeldung der Ansaugpumpe.

Besondere Ereignisse wurden in einem Stalltagebuch und zusätzlich in einer Datei festgehalten.

Kurzzeitige Stromschwankungen oder -ausfälle konnten mittels einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) für den Computer überbrückt werden. Die Messtechnik hingegen funktionierte bei einem Stromausfall nicht.

Die Messwerte wurden fortlaufend auf ihre Plausibilität geprüft. Nach dem Einstellen wurden die Messungen der Sensoren des zugehörigen Abteils mit denen eines Referenzgerätes überprüft. Nach dem Ausstallen der Tiere wurden alle Sensoren im jeweiligen Abteil ausgebaut und gereinigt.

3.4.2 Praxisbetriebe

Die Überwachung der Praxisbetriebe gestaltete sich schwieriger. Eine Onlineüberwachung war aus technischen Gründen an den Betrieben nicht umsetzbar. Der wöchentliche Besuch der Betriebe wurde angestrebt, zusätzlich wurde telefonisch mit den Landwirten Rücksprache gehalten. In warmen Untersuchungszeiträumen wurden die Betriebe mehrmals in der Woche besucht. Technische Probleme ergaben sich gehäuft bei der Schad-

gasmessung, sodass die Messtechnik zeitweise täglich kontrolliert werden musste. Zeitgleich wurden die Werte auf ihre Plausibilität überprüft. Nach dem Ausstallen der Tiere wurde die gesamte Messtechnik abgeschaltet, die Sensoren ausgebaut und gereinigt, defekte Sensoren wurden ausgetauscht. Für jeden Betrieb wurde auch ein Stalltagebuch geführt.

3.4.3 Luftvolumenstrombestimmung

Um die Luftrate zu bestimmen, wurden Messventilatoren der Firma Reventa in alle Abluftkamine der Versuchsabteile eingebaut. Eine Umrechnungstabelle ($U \text{ min}^{-1} \rightarrow \text{m}^3 \text{ h}^{-1}$) für die unterschiedlichen Messventilatoren wird vom Hersteller bereitgestellt (Anhang Abb. A 1). Durch den Einbau und je nach Position des Messventilators im Abluftkanal verändert sich der Umrechnungsfaktor. Um einen passenden Umrechnungsfaktor für die jeweiligen Messventilatoren zu erhalten, wurde ein weiterer Messventilator benötigt. Dieser wurde in einen handelsüblichen Abluftkaminschacht mit einem Innendurchmesser von 65cm (siehe Abb. 27) eingebaut. Um den Transport zu erleichtern, war der Schacht in zwei 1m große Stücke zerlegbar.

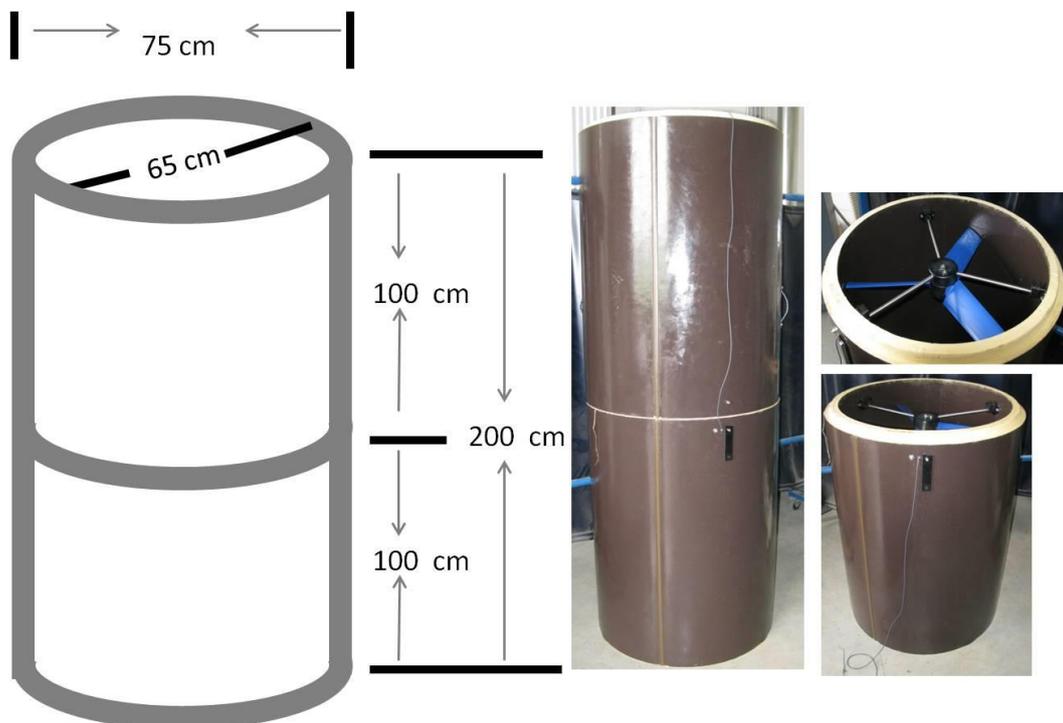


Abb. 27: Skizze mit Bemaßung und Ablichtung des eingebauten Kalibrationsventilators.

Der Messventilator wurde in eingebautem Zustand mit dem Abluftschacht von der Firma Ziehl Abegg kalibriert. Folgende Abbildung zeigt, dass die neuen Werte sehr nah an den Vorgabewerten der Firma Reventa lagen. Um die Messwerte des Messventilators zu er-

fassen, wurden ein multifunktionales Messgerät und Datenlogger des Typs Almemo® 2890-9 der Firma Ahlborn angeschlossen.

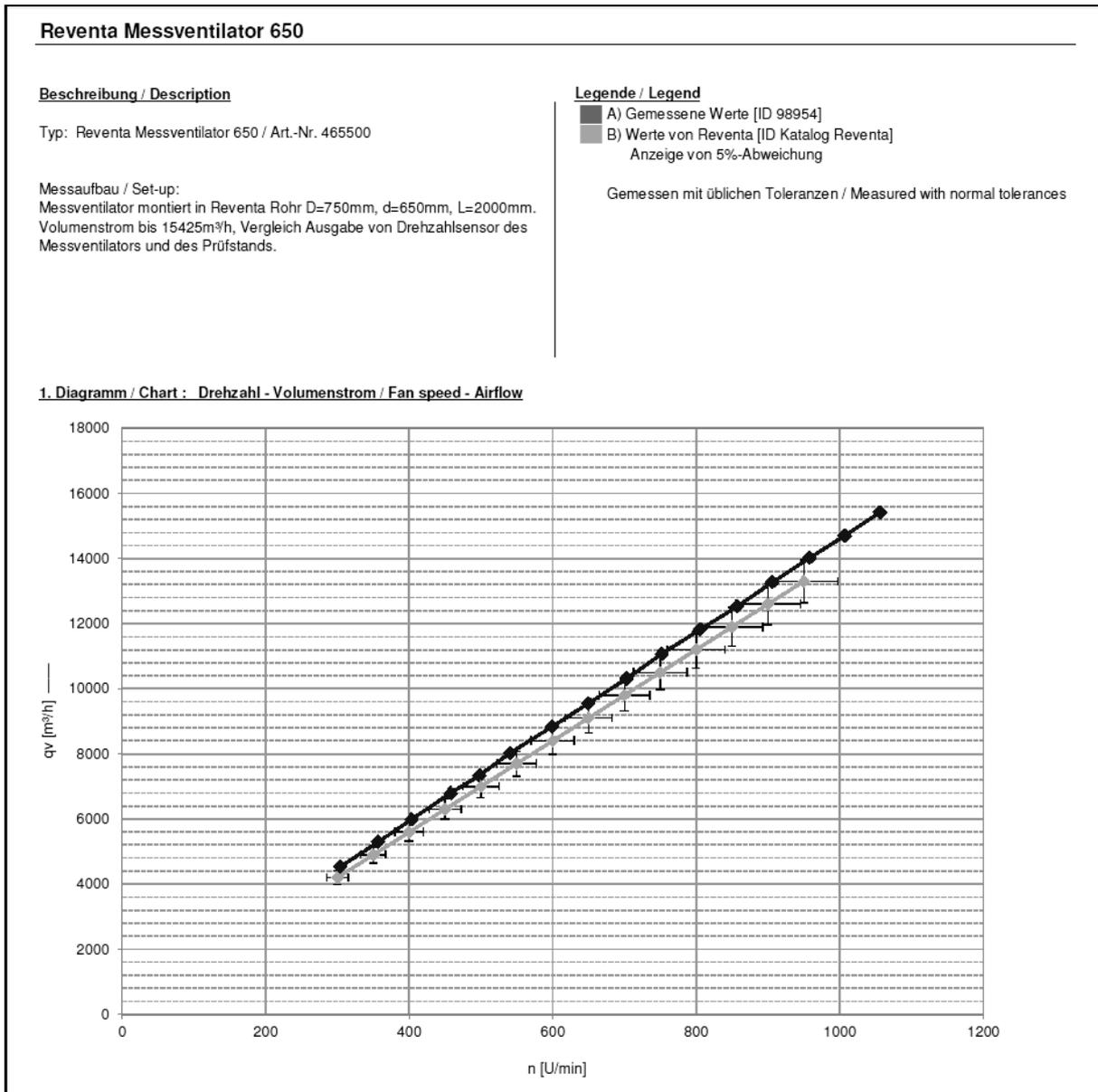


Abb. 28: Messprotokoll der Firma Ziehl-Abegg (KOBBER, 2012)

Die Kalibrationen der Messventilatoren wurden bei Windstille durchgeführt.

3.4.3.1 Kalibration und Auswertung der Messventilatoren an der LSZ Boxberg

In den vier Abluftkaminen der LSZ Boxberg war jeweils ein Messventilator an der Ansaugseite des Kamins eingebaut. Der Innendurchmesser der Abluftkamine betrug 73 cm, der Außendurchmesser 83 cm. Der Außendurchmesser des Kalibrationssystems betrug 75 cm

und konnte direkt auf den Abluftkamin gestellt werden. Zuvor wurden die Abluftdiffusoren entfernt (siehe Abb. 29). Zur besseren Datenauswertung wurden die Uhren des Ahlborn Handgerätes und die der Ahlbornsoftware auf dem Mess-PC synchronisiert und der Abfragerhythmus auf 10 Sekunden gestellt. Eine Messeinheit betrug 10 Minuten. Die Messungen erfolgten bei fünf verschiedenen Lüftereinstellungen. Gestartet wurde bei einer Lüfterleistung von 100%, anschließend wurde in 20er Schritten die Lüfterleistung gedrosselt. Die letzte Messung erfolgte bei einer Lüftereinstellung von 20%. Damit es zur keiner Beeinflussung der Ergebnisse durch die Übergänge der Lüfterstufen kam, wurde zwischen den Messungen eine Pause von ca. einer Minute gemacht. Dies reichte aus, um die Lüfterleistung konstant zu halten.

Die Auswertung erfolgte mittels Microsoft Excel 2007 und OriginPro 8. In Excel wurden die Messergebnisse zusammengefasst und der Mittelwert über die jeweilige Messphase gebildet. Aus den Daten des kalibrierten Messventilators wurde der mittlere Volumenstrom über die zehnminütige Messung berechnet. Weiterhin wurde der Mittelwert aus den Messdaten des zu kalibrierenden Messventilators berechnet und das Impulssignal in Umdrehungen pro Minute umgewandelt. Dieser Wert und der dazugehörige Volumenstrom wurden in dem Programm OriginPro 8G gleich gesetzt. OriginPro 8G berechnete die Kalibrationsgerade und die dazugehörigen Gleichungen. Des Weiteren wurde auch das Bestimmtheitsmaß R^2 berechnet. Im Folgenden sind die vier Messventilatoren mit den dazugehörigen Kalibriergeraden dargestellt.



Abb. 29: Aufbau zur Kalibration des Messventilators an der LSZ Boxberg

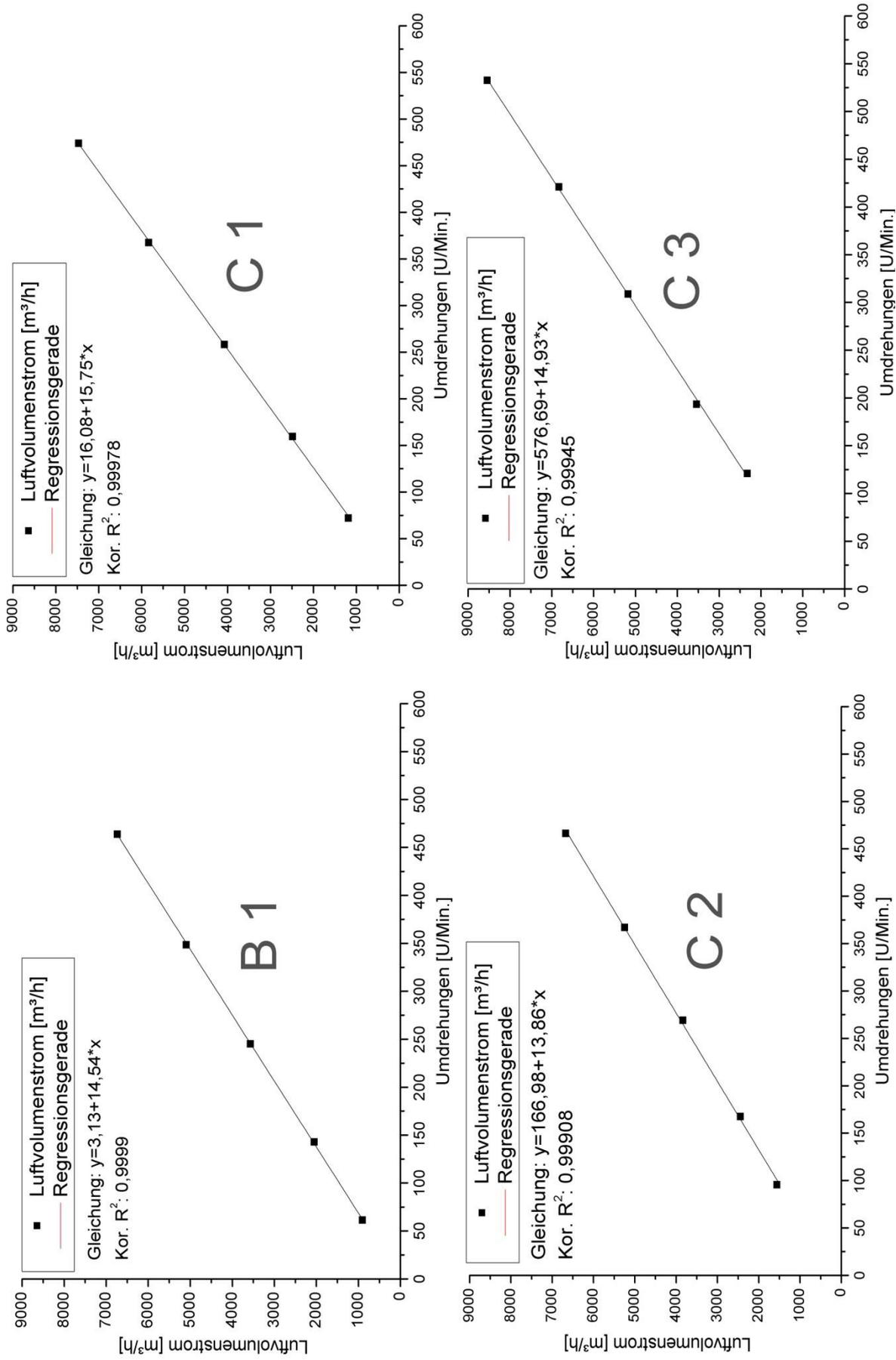


Abb. 30: Kalibrationsgeraden der Messventilatoren der Abteile B1 (Kühlpad), C1 (Referenzabteil), C2 (Hochdruckbefeuchtung) und C3 (Unterflurzuluft).

Die Steigungen der vier Kalibrationsgeraden liegen zwischen 13,86 und 15,75. Die Abweichung untereinander ist geringer als die Abweichung der vom Hersteller (Faktor 19,6) gegebenen Empfehlung. Das Ergebnis entspricht dem Wert, der nach der DIN 18910 berechnet wurde. Auch die Untersuchungsergebnisse der DLG (NIETHAMMER, 2000) des Lüftungsventilators bestätigen das Ergebnis des neu kalibrierten Messventilators.

3.4.3.2 Kalibration der Messventilatoren auf den Praxisbetrieben und Auswertung

Die drei Praxisbetriebe unterschieden sich in den Durchmessern der Abluftkamine. So hatte Betrieb A (EWT) mit 45 cm Innendurchmesser den kleinsten Abluftkamin. Betrieb B (Unterflur) hatte zwei unterschiedliche Abluftschächte. Der kleinere des Betriebes hatte 50 cm Innendurchmesser und der größere einen Innendurchmesser von 65 cm. Diesen Durchmesser wiesen auch die vier Abluftschächte des Betriebes C (HDB) auf. Auf alle Abluftschächte mit dem Durchmesser von 65 cm wurde die Kalibrationseinheit einfach aufgesetzt, da diese den gleichen Durchmesser besaß. Mit Hilfe eines Klebebandes wurde der Spalt zwischen Abluftkamin und Kalibrationsvorrichtung abgedichtet. Bei dem Betrieb C (HDB) wurden zusätzlich Stofftücher verwendet, da man das Klebeband nicht überall anbringen konnte. Grund hierfür waren die Diffusoren, die nicht deinstalliert werden konnten. Dennoch war schon durch das passende Aufeinandersetzen der Schächte kein messbarer Unterschied mehr gegeben, sodass im Abdichten eine Zusatzmaßnahme gesehen werden kann, die der zusätzlichen Stabilisierung diene.

Die Messventilatoren wurden mit einer speziellen Vorrichtung von oben in die Abluftkamine gehängt (siehe Abb. 31). Ein anders gestalteter Einbau war nicht möglich. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Abstand zum Ventilator immer mindestens drei Meter betrug.



Abb. 31: Von oben eingebauter Messventilator.

Es wurde versucht, bei fünf verschiedenen Lüftereinstellungen die Kalibrationsmessungen durchzuführen, dies war allerdings nicht immer möglich. Bei Betrieb A (EWT) (Abb. 32) konnte man wetterbedingt erst ab einer Lüfterleistung von 60% Messwerte erzielen. Der Betrieb C hat vier Abluftkamine, wovon nur einer geregelt ist. Die anderen werden je nach Temperatur mit ca. 100% zugeschaltet. Dadurch ist bei diesen nur ein Messintervallwert möglich. Folgende Tabelle zeigt die Gleichungen der ermittelten Kalibrationsgeraden.



Abb. 32: Kalibration der Messventilatoren auf den Praxisbetrieben. (oben links) Betrieb A Erdwärmetauscher; (oben rechts) Betrieb B Unterflurzuluft; (unten) Betrieb C Hochdruckbefeuchtung

Tab. 17: Durchmesser der Abluftkamine der Praxisbetriebe und die Kalibrationsgeraden der Messventilatoren.

Betrieb	Ventilator Durchmesser	Luftvolumenstromgleichung
A (Erdwärmetaucher)	45 cm	$y=6,14x+295,2$
B (Unterflurzuluft)	50 cm	$y=8,37x+84,8$
	65 cm	$y=12,92x+597,49$
C (Hochdruckbefeuchtung)	65 cm	$y=15,01x$
	65 cm (geregelt)	$y=16,46x-990,5$
	65 cm	$y=14,61x$
	65 cm	$y=14,37x$

3.4.4 Kalibration des Multigasmonitors

Die verschiedenen Kalibrationen wurden nach dem Handbuch LUMASENSE TECHNOLOGIE A/S (2007) von LumaSense Technologies für den Multigasmonitor 1412 an der Universität Hohenheim durchgeführt. Für die Bedienung des Multigasmonitors bei den Vorgängen zur Kalibrierung wurde die Software 7304 verwendet. Das Gerät sollte laut Hersteller eine Warmlaufzeit von mindestens einer halben Stunde haben. Durchgeführt wurden folgende Kalibrierungen:

- Nullgaskalibration
- Wasserinterferenzkalibration
- Messbereichskalibration (Ein-Punkt -Kalibration)
- Kreuzinterferenzkalibration

Zur Kalibration wurden folgende zertifizierte Prüfgase verwendet:

- Ammoniak 10 ppmV (tatsächliche Konzentration 9,5 ppmV); Stickstoff Rest M3; Serien Nr.: 83224
- Ammoniak 100 ppmV (tatsächliche Konzentration 95,5 ppmV); Stickstoff Rest M3; Serien Nr.: 71022
- Methan 10 ppmV (tatsächliche Konzentration 9,7 ppmV); Stickstoff Rest; Serien Nr. 73955
- Methan 100 ppmV (tatsächliche Konzentration 98,8 ppmV); Stickstoffrest; Serien Nr. 16249
- Kohlendioxid 500 ppmV (tatsächliche Konzentration 505 ppmV); Stickstoffrest; Serien Nr. 77208
- Kohlendioxid 5000 ppmV (tatsächliche Konzentration 4990 ppmV); Stickstoffrest; Serien Nr. 78478

Neben der Kalibration wurden Vergleichsmessungen zwischen den zwei Multigasmonitoren und einem weiteren Schadgasmessgerät (FTIR der Firma Ansyco) durchgeführt. Die in Tab. 37 gezeigten Stallmessungen wurden nach Vergleichsmessungen von Prüfgas durchgeführt. Insgesamt ergaben sich immer einige Differenzen zwischen den zwei Multigasmonitoren. So waren die Vergleichsmesswerte des Gerätes aus Hohenheim stets etwas höher als die des Gerätes aus Boxberg bzw. als die Messwerte des FTIR. Weiterhin war bekannt, dass das Gerät aus Hohenheim gelegentlich Extremwerte anzeigte (siehe Tab. 37). Diese wurden als falsch identifiziert und in der späteren Untersuchung als Ausreißer gelöscht.

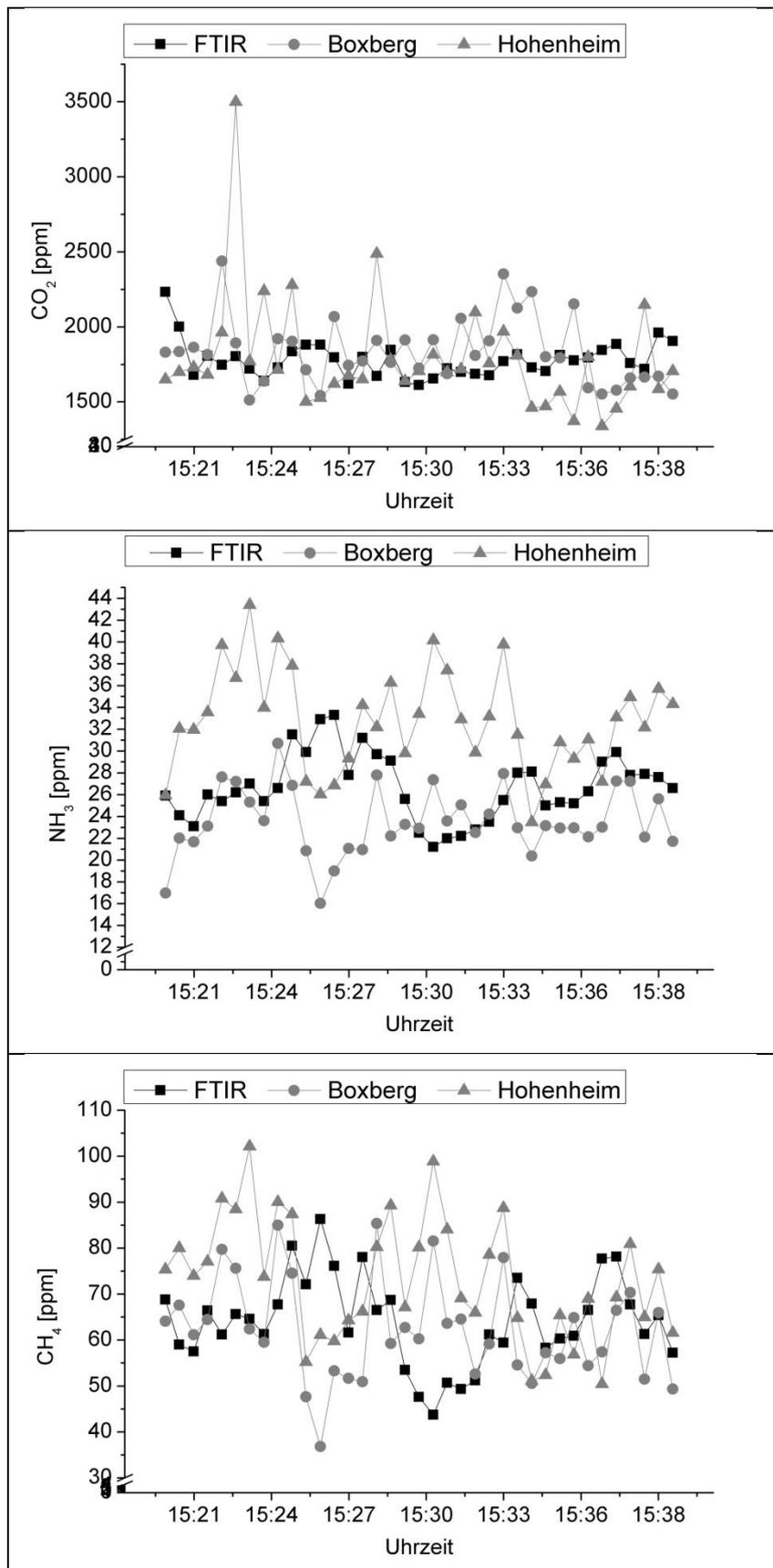


Abb. 33: Vergleichsmessungen der Konzentration von CO₂ (oben), NH₃ (Mitte) und CH₄ (unten) in der Stallluft zwischen FTIR, Multigasmonitor von der LSZ Boxberg und Multigasmonitor von der Uni Hohenheim.

3.5 Datenerfassung und Aufbereitung

Bei der Datenerfassung war an der LSZ Boxberg zum Teil anders als auf den Praxisbetrieben. Dies wird in den folgenden zwei Punkten genauer beschrieben. Zur Aufbereitung der umfangreichen Messdaten wurden unterschiedliche Berechnungen durchgeführt, die im Anschluss detailliert dargestellt werden. Alle Berechnungen wurden für die vier Betriebe in gleicher Weise durchgeführt. Die Berechnung des Luftvolumenstroms wurde unter Kapitel 3.4.3 bereits dargestellt.

3.5.1 LSZ Boxberg

Zeitlich wurden die Daten je nach Messeinheit in festen Intervallen erfasst. Bei der Ahlborn ALMEMO[®] wurde am Anfang des Versuchs ein Intervall von drei Sekunden gewählt. Dies brachte allerdings Probleme bei der Datenübermittlung mit sich, sodass das Intervall auf 30 Sekunden eingestellt wurde. Dieses immer noch hohe Intervall war aus technischen Gründen notwendig, gleichzeitig konnte damit zudem eine gute Rückverfolgbarkeit von plötzlichen Klimaänderungen gewährleistet werden. Bei der Messwerterfassung, die auf dem System der Wago basierte, wurde jede Minute eine Zählerstandabfrage durchgeführt. Bei dem Multigasmonitor mussten mehrere Grundvoraussetzungen beachtet werden. So kann zu einem festen Zeitpunkt immer nur eine Messstelle beprobt werden. Hierfür benötigt das Messgerät zwischen 30 Sekunden und einer Minute. Damit das Messergebnis nicht von der vorherigen Messstelle beeinflusst wurde, wurden immer vier Wiederholungen an der jeweiligen Messstelle durchgeführt. Die Werte der letzten Wiederholungsmessung wurden später als Ergebnis genommen. Um auch den Einfluss der Reihenfolge der Messstellenabfrage auszuschließen, wurde diese randomisiert, die Abfragereihenfolge der elf Messstellen wurde somit zufällig gewählt. Nachdem alle elf Messstellen beprobt wurden, startete die Abfrage von neuem. Dadurch können die Messwerte von einem Messpunkt zwischen 30 und 65 Minuten auseinander liegen.

Alle Messwerte wurden zunächst in eine Exceldatei umgewandelt und dort auf Plausibilität überprüft (siehe Tab. 18). Weiterhin wurden die Impulswerte des Durchflussmessers und des Messventilators in Durchflussmenge [l h^{-1}] bzw. Luftvolumenstrom [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$] umgewandelt. Die Daten aus den Zeiträumen, in denen das Abteil leer stand, wurden gelöscht, bevor am Ende eine Datenbank erstellt wurde, aus der dann die Daten für bestimmte Fragestellungen abgefragt werden konnten.

3.5.2 Praxisbetriebe

Bei den Praxisbetrieben wurden die Messwerte der Klimasensoren alle drei Minuten aufgezeichnet. Die Zählerstände von Wasser und Strom wurden auch hier jede Minute abgefragt. Da nur ein Schadgasmessgerät für die Praxisbetriebe zur Verfügung stand, wurde dieses in einem Rhythmus von drei Wochen von Betrieb zu Betrieb gebracht, wo es dann je eine Woche stand. Dieser Rhythmus wurde besonderen Wetterbedingungen, wie beispielsweise einer kurzen Hitzewelle, angepasst. Auf den Betrieben wurde von drei bzw. bei Betrieb C von vier Stellen Luft zur Schadgasuntersuchung angesaugt. Die Abfragereihenfolge war auch hier zufällig. Durch die geringere Zahl an Messstellen war das Abfrageintervall pro Messstelle geringer als an der LSZ Boxberg. Die Zeit zwischen den Messergebnissen betrug 6 bis 20 Minuten.

Die Aufbereitung der Messwerte wurde nach dem gleichen Prinzip wie bei den Werten der LZB Boxberg (Kap. 3.5.1) durchgeführt.

Tab. 18: Kriterien der Plausibilitätsprüfung

Messwernerfassung	direkte Löschung		Löschen nach Überprüfung, Abweichung zum vorigen Messwert von mehr als:
	< -25 °C	> + 50°C	
Temperatur	< -25 °C	> + 50°C	+/- 3 K
relative Feuchte	< 10 %	> 100%	
Luftgeschwindigkeit	< 0 m s ⁻¹	> 4 m s ⁻¹	
Differenzdruck	< -60 Pa	> + 25 Pa	
Messventilator	< 20 U min ⁻¹	> 3000 U min ⁻¹ ₁	
Zählerwerte der Wago			
Energie	< 0 kWh		> 1 kWh
Wasser	< 0 l		> 100 l
Multigasmonitor			
NH ₃ & CH ₄	< 0 ppm	> 100 ppm	> 20 ppm
CO ₂	< 0 ppm	> 4000 ppm	> 1000 ppm

3.5.3 Emissionsberechnung

Es wurden die Emissionen der Gase CO₂, NH₃ und CH₄ berechnet. Dafür wurden zuerst die Mittelwerte aus den Schadgasmessungen (Zuluft und Abluft) und die des Luftvolumenstroms jeweils von einem Tag gebildet. Im nächsten Schritt wurde die Hintergrundkonzentration von der Abluftkonzentration ($x_i^{\text{Abluft}} - x_i^{\text{Zuluft}}$) subtrahiert. Diese Differenz wurde anschließend von Volumenkonzentration [ppm] in die Massenkonzentration (mg m⁻³) nach

Gleichung (2) umgewandelt. Dieser Wert wurde im Anschluss mit dem Luftvolumenstrom in Gleichung (1) multipliziert.

$$c_i = \frac{0,1 \cdot M \cdot p \cdot x_i}{R \cdot T} \quad (2)$$

c_i	[mg m ⁻³]	Massenkonzentration
0,1		Umrechnungsfaktor
M	[g mol ⁻¹]	Molare Masse
p	[mbar]	Referenzdruck (Normdruck 1013 mbar)
R	[J (K mol) ⁻¹]	Molare Gaskonstante 8,314472 J (K mol) ⁻¹
T	[K]	Referenztemperatur Normaltemperatur 293,15 K (20°C)
x_i	[ppm]	Volumenkonzentration

Die errechneten Emissionsmassenströme wurden in zweierlei Hinsicht weiterverarbeitet. Zum einen dienten sie der Berechnung der Jahresemission eines Abteils bezogen auf den Tierplatz. Dazu wurde die Summe der Tagesemissionen durch die Anzahl an Messtagen geteilt und dann auf 330 Tage aufsummiert. Hierbei wurde sich auf eine jährliche Belegung eines Stallplatzes von 330 Tagen bezogen, die allgemein als Vergleichsgröße für Emissionsmengen in der Schweinemast angenommen wird (GALLMANN, 2003; HÄUßERMANN, 2006). Dieser Wert wurde dann nochmals durch die Anzahl an Tierplätzen des Abteils geteilt (siehe Gleichung (3)).

$$E_{Tierplatz \cdot a} = \frac{\sum_{n=1}^{n_{max}} e_i \cdot 24 \cdot 330}{n \cdot 125} \quad (3)$$

$E_{Tierplatz \cdot a}$ [g a⁻¹] Emission pro Tierplatz und Masstjahr (330 Tage)

n_{max} [d] Anzahl Messtage

Zum anderen dienten die Ergebnisse aus Gleichung (1) der Ermittlung der Emissionen pro Großvieheinheiten (GV, 500 kg Lebendgewicht). Die Emission konnten somit unabhängig vom Tiergewicht verglichen werden, was durch die versetzten Einstalltermine in Boxberg von besonderer Bedeutung war. Aber auch der Vergleich mit Literaturwerten war dadurch gegeben (KECK, 1997; GALLMANN, 2003; HÖLSCHER, 2006). Die Tiergewichte wurden anhand des Produktionsberichts der LSZ Boxberg berechnet. Hieraus wurde das Abteilgewicht der jeweiligen Tage berechnet, unter der Berücksichtigung der Verluste oder Abgänge zur Schlachtung. Dieser Wert konnte dann in Gleichung (4) eingesetzt werden.

$$E_{GV} = \frac{\sum_{n=1}^{n_{max}} e_i \cdot 500}{\sum_{n=1}^{n_{max}} m_i} \quad (4)$$

E_{GV}	[g h ⁻¹]	Emission je Großvieheinheit
e_i	[g h ⁻¹]	durchschnittliche Emission an einem Tag
m_i	[kg]	Abteilmgewicht
n_{max}		Anzahl Messtage
500	[kg]	Großvieheinheit

3.5.4 Wärmebilanzrechnung Abteil

Die Wärmebilanzrechnung wurde durchgeführt, um bauliche Einflüsse auf die Versuchsergebnisse zu beurteilen. So besitzt Abteil C3 (Unterflurzuluft) drei Außenwände, im Gegensatz zu allen anderen Abteilen mit nur zwei Außenwänden. Die hier berechnete Wärmebilanz ergibt nur Orientierungswerte, da für eine exakte Aussage wesentlich genauere Daten speziell der vom Tier stammenden Wärmeabgabe nötig wären. Grundlage der Berechnung waren die DIN 18910 (2004) und die DIN 13370 (1998). Die DIN 13370 (1998) dient zur Berechnung der Wärmeverluste über das Erdreich. Sie lässt eine genauere Ermittlung der Untersuchungswerte von Bodenplatten und Wänden im Erdreich zu. Zur Berechnung der Wärmeverluste durch die Lüftung wurde die DIN 18910 (2004) eingesetzt. Für die Wärmeabgabe durch die Tiere wurde auf die aktuelleren Werte von PEDERSEN & SÄLLVIK (2002) zurückgegriffen, die in der DIN 18910 (2004) zum Teil noch aus früheren Untersuchungen stammen. Basierend auf den Vorgaben der Richtlinien wurde eine Exceltabelle erstellt, in die die Messwerte des zu bewertenden Untersuchungszeitraumes eingepflegt wurden. Hierbei wurden die Wärmeverluste der einzelnen Bauteile und die Wärmeverluste der Lüftung berechnet.

3.5.5 Erwärmungsrechnung / Kühlungsrechnung

Um eine quantitative Aussage über die Kühlleistung bzw. den Wärmegewinn der einzelnen Systeme zu treffen, wurde anhand der gemessenen Temperaturveränderungen der Zuluft von außen bis zum Abteil die Enthalpieänderung der Luft berechnet. Diese entspricht der von der Luft aufgenommenen oder abgegebenen Energiemenge [kWh] und berechnet sich nach Gleichung (5) (KIRSCHNER et al., 1976; VON BÖCKH, 2006).

$$Q = m_L \cdot c_p \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad (5)$$

Q	[kWh]	Wärmemenge
m_L	[kg h ⁻¹]	Zuluftmasse
c_p	[kWh (kg K) ⁻¹]	spezifische Wärme der Luft
ϑ	[°C]	Temperatur

Die so errechneten Werte dienen ebenfalls nur der Schätzung, da an den Zuluftpunkten nur an einer Stelle gemessen wurde und so die Schwankungen über den Querschnitt der Zuluffläche nicht weiter berücksichtigt wurden.

Bei der Hochdruckbefeuchtung ist die oben aufgeführte Gleichung nicht einsetzbar, da in dem Abteil die Tiere Einfluss auf die Stalltemperatur nehmen. In diesem Fall wird die Verdunstungsenergie von Wasser herangezogen, um die Kühlleistung der Hochdruckbefeuchtung zu errechnen. Diese errechnet sich aus der Gleichung (6) (KUTTLER, 2009). Das Ergebnis wird mit der verbrauchten Wassermenge multipliziert.

$$Q_V = (2500,8 - 2,372 \cdot t) \cdot m_w \quad (6)$$

Q_V	[kJ]	Verdunstungswärme von Wasser
t	[°C]	Wassertemperatur
2500,8	[kJ kg ⁻¹]	Verdunstungswärme von Wasser bei 0°C
m_w	[l]	Wassermenge

3.5.6 Temperature Humidity Index (THI)

Um den THI zu berechnen, benötigt man die Feuchttemperatur der Stallluft. Mit der verwendeten Messtechnik konnte jedoch nur die relative Luftfeuchte gemessen werden. Aus diesen Werten kann über eine Näherungsgleichung die Feuchttemperatur bestimmt werden, wie es von GLÜCK (1991) beschrieben wird. Auf dieser Grundlage hat das Institut für Luft- und Kältetechnik (ILK DRESDEN, 2010) das Programm ILK-hx-Dia entwickelt, welches als freie Software unter der Adresse <http://www.ilkdresden.de/hxdia> zu beziehen ist. Mit diesem Programm wurde die Feuchttemperatur bestimmt.

Zur Berechnung des THI wird die Gleichung (7) von ROLLER und GOLDMAN (1969) verwendet.

$$THI = 0,45 \cdot T_{wb} + 1,35 \cdot T_{db} + 32 \quad (7)$$

THI		temperature humidity index
T_{wb}	[°C]	wet-bulb temperature (Feuchttemperatur)
T_{db}	[°C]	dry-bulb temperature (Trockentemperatur)

3.5.7 Theoretischer Wasserverbrauch

Zur Überprüfung der Wasserzähler des Kühlpads und um weitere Folgerechnungen anzustellen, wurde die Menge an Wasser berechnet, die die Luft beim Durchströmen des Kühlpads aufnimmt. Diese wurde unter Verwendung der Messwerte für die relative Feuchte der Luft vor und hinter dem Kühlpad mittels der Gleichung (8) (KRETZSCHMAR & KRAFT, 2011) berechnet.

$$x_W = \frac{R_L}{R_W} \cdot \frac{\varphi \cdot p_{Ds}}{(p - \varphi \cdot p_{Ds})} \quad (8)$$

X_W	[g m ⁻³]	Wassergehalt (absolute Feuchte) der ungesättigten feuchten Luft
R_L	[kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	spezifische Gaskonstante von trockener Luft
R_W	[kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	spezifische Gaskonstante von Wasser
φ	[%]	relative Feuchte der ungesättigten feuchten Luft
p_{Ds}	[kPa]	Sättigungspartialdruck von Wasser bei der Temperatur ϑ bei $\vartheta \geq 0,01^\circ\text{C}$: Dampfdruck $p_{Ds}=p_s(\vartheta)$
p	[kPa]	Gesamtdruck der feuchten Luft

Um den Wasserverbrauch zu erhalten, wird der ermittelte Wassergehalt der Innenluft von dem ermittelten Wassergehalt der Außenluft subtrahiert ($x_{WI} - x_{WA}$) und anschließend mit der Luftmasse multipliziert. Das Ergebnis aus Gleichung (9) beinhaltet nur die Wassermenge, die von der Luft aufgenommen wurde. Tropfwasserverluste sowie verspritztes Wasser werden dabei nicht berücksichtigt.

$$x_{W_{Verbrauch}} = (x_{WA} - x_{WI}) \cdot \dot{V} \cdot \rho \quad (9)$$

$x_{W_{Verbrauch}}$	[g m ⁻³]	Wasserverbrauch (Wassermenge, die von der Luft aufgenommen wurde)
---------------------	----------------------	---

x_{WA}	[g m ⁻³] Wassergehalt der Luft außen
x_{WI}	[g m ⁻³] Wassergehalt der Luft innen
ρ	[g m ⁻³] Dichte der Luft
\dot{V}	[m ³ h ⁻¹] Luftvolumenstrom

3.6 Tierwohlbefinden & Tierdaten

Tierdaten Boxberg

Da es sich bei der Landesanstalt für Schweinezucht um eine Lehr- und Versuchsanstalt handelt, war es möglich, alle Tierdaten einzeltierbezogen zu erhalten. So wurde nach jedem Mastdurchgang ein detaillierter Bericht verfasst, auf dessen Daten im vorliegenden Bericht die Angaben zu Tageszunahme, Ein- und Ausstallgewicht, Ausschachtung, Futtermittelverwertung und Schlachtbefunde basieren.

Tierdaten Praxisbetriebe

Da es für die Praxisbetriebe von Vorteil ist, größere Chargen an Tieren abzugeben, kamen hier Tiere aus unterschiedlichen Abteilen auf den Schlachthof. Dadurch war eine genaue Zuordnung der Leistungsdaten zu den jeweiligen Untersuchungsabteilungen nicht möglich.

Tierwohlbefinden

An der LSZ Boxberg sowie an den drei weiteren an dem Versuch beteiligten Praxisbetrieben wurden Untersuchungen zum Tierwohlbefinden bei Mastschweinen durchgeführt. Mittels Direktbeobachtung und selbst erstellter Beobachtungsbögen wurde das Verhalten der Tiere aufgenommen. Dieser Themenbereich und die inhaltliche Darstellung wurden auch im Rahmen der Abschlussarbeit „Untersuchungen zum Tierwohlbefinden von Mastschweinen bei unterschiedlichen Zuluftvarianten“ (HAMMER, 2011) bearbeitet und zum Teil hier übernommen.

Um zu prüfen, ob sich das Verhalten der Schweine zwischen den verschiedenen Zuluft- und Kühlungssystemen unterscheidet, wurden verschiedene Beobachtungsbögen erstellt. Hierzu war es notwendig, die zu beobachtenden Verhaltensweisen eindeutig zu definieren.

An der LSZ Boxberg wurde im ersten Versuchsabschnitt (Mai 2011 bis August 2011) das Neugier-, Erkundungs- und Beschäftigungsverhalten, das Liege- und Stehverhalten, das Atmungsverhalten, die Buchtenverschmutzung sowie das Integument der Tiere beobachtet und untersucht. Anhand einer Vormittagsbeobachtung und einer Nachmittagsbeobachtung sollten die aktiven Phasen der Tiere erfasst werden. Für die Beobachtung der Abteile wurde keine bestimmte Reihenfolge festgelegt. Innerhalb von eineinhalb Stunden wurde

jedes der vier Abteile vormittags oder nachmittags beobachtet. Jede Verhaltensweise wurde in dieser Zeit 12-mal aufgenommen. Zuerst wurden die Integumentbeurteilung (an zwei zufällig ausgewählten Tieren einer Bucht) und die Buchtenverschmutzung aufgenommen, damit sich die Tiere an die beobachtende Person gewöhnen konnten. Anschließend wurden im Fünfminutentakt das Atmungs-, Neugier-, Erkundungs- und Beschäftigungsverhalten sowie das Liege- und Stehverhalten beobachtet. Auf einer Leiter sitzend wurden jeweils die vier hinteren Buchten eines Abteils beobachtet. Jede Bucht wurde alle 20 Minuten für fünf Minuten beobachtet.

In einem zweiten Versuchsabschnitt (Januar 2012 bis August 2012) beschränkte man sich an der LSZ Boxberg sowie an den Außenbetrieben auf die Buchtenverschmutzung und eine vereinfachte Integumentbeurteilung der Tiere. Dafür wurde jedoch das Integument aller Tiere an allen Versuchstagen bewertet. Die Außenbetriebe sollten 14tägig besucht werden.

An jeden Beobachtungstag wurden, zeitgleich zur Beobachtung, Temperatur, Feuchte und Schadgaskonzentrationen (CH_4 , NH_3 , CO_2) aufgenommen.

Beim Neugier-, Erkundungs- und Beschäftigungsverhalten, beim Liege- und Stehverhalten sowie beim Atmungsverhalten wurde die sogenannte Scan-Sampling-Methode verwendet. Die Integumentbeurteilung der Tiere wurde mit Hilfe einer Fokustierbeobachtung durchgeführt. Für das Liege- und Stehverhalten und für die Buchtenverschmutzung wurden die zu beobachtenden Buchten in mehrere Rechtecke eingeteilt, um die Position der Tiere bzw. die Stellen der Verschmutzung deutlicher zu beschreiben.

Die Buchten auf einer Seite des Abteils wurden spiegelverkehrt zu der anderen Seite eingeteilt. Zum besseren Verständnis soll Abb. 34 dienen.

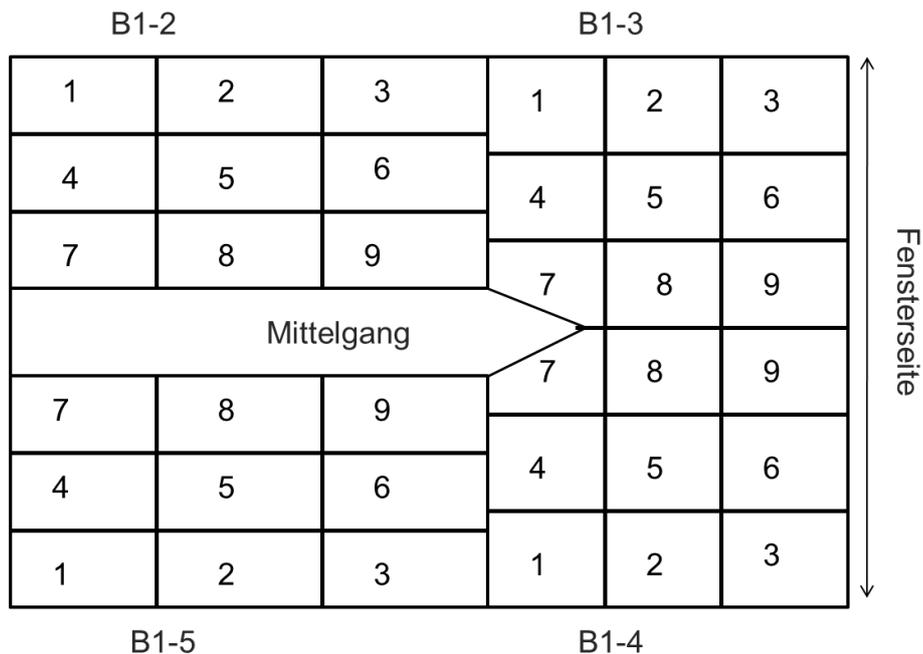


Abb. 34: Buchteneinteilung und -beschriftung am Beispiel eines Mastabteils der LSZ Boxberg

Das **Neugier-, Erkundungs- und Beschäftigungsverhalten** wurde in Beschäftigung mit Buchtenpartner (Schwanz-/Ohrbeißen, Sonstiges), Beschäftigung mit Buchtenelement, Beschäftigung mit Beschäftigungstechnik, Futteraufnahme, Wasseraufnahme, Wühlen sowie sonstiges Verhalten eingeteilt (in Anlehnung an PFLANZ, 2007).

Beim **Liege- und Stehverhalten** wurde in Seitenlage, Bauchlage, Stehen, Gehen und Sitzen sowie Sonstiges unterschieden (in Anlehnung an PFLANZ, 2007).

Das **Atmungsverhalten** wurde im ersten Versuchsabschnitt an der LSZ Boxberg in normales Atmen, Hecheln, Husten, Niesen und Sonstiges eingeteilt (in Anlehnung an PFLANZ, 2007). Bei den Beobachtungen des zweiten Versuchsabschnitts kam das Verhalten „schnelles Atmen“ hinzu. Beim „Hecheln“ wurde nicht unterschieden, ob die Tiere aufgrund einer Krankheit oder aufgrund von Hitzestress hechelten.

Bei der **Buchtenverschmutzung** wurden die eingeteilten Rechtecke der Versuchsbuchten (siehe Abb. 34) auf ihre Verschmutzung untersucht. Ziel dieser Beobachtung war eine bessere Charakterisierung der Verschmutzung innerhalb der Buchten. Es sollte herausgefunden werden inwiefern sich die Tiere an die vorgegebene Buchtenstruktur (Fress-/Aktivitäts-, Liege- und Kotbereich) halten, sich eine eigene Strukturierung schaffen oder aufgrund anderer Einflüsse, wie erhöhte Temperaturen oder Schadgaskonzentrationen,

ihre Buchten umstrukturieren. Die Verschmutzung wurde nach folgendem Schema bewertet:

0-25% = keine Verschmutzung, 25-50% = wenig Verschmutzung, 50-75% = mittlere Verschmutzung und 75-100% = starke Verschmutzung.

Als verschmutzt galten nasse und/oder mit Kot oder Futter verschmierte Flächen.

Anhand der **Integumentbeurteilung** sollte der Gesundheitszustand der Tiere in den unterschiedlichen Haltungssystemen festgestellt werden. Im ersten Versuchsabschnitt an der LSZ Boxberg wurde die Verschmutzung und der Zustand aller Körperteile eines Tieres bewertet. Im zweiten Versuchsabschnitt an der LSZ Boxberg und auf allen Außenbetrieben wurden alle am Versuch beteiligten Tiere zu jedem Beobachtungstermin beurteilt. Es wurde sich auf den Zustand des Körpers, der Ohren, des Schwanzes sowie den Verschmutzungsgrad des Tieres beschränkt. Die Körperverschmutzung sollte hierbei einen Indikator für ein richtig oder falsch temperiertes Abteil darstellen. Eingeteilt und bewertet wurde der Tierkörper nach der Ekesbo-Methode (siehe Abb. 35).

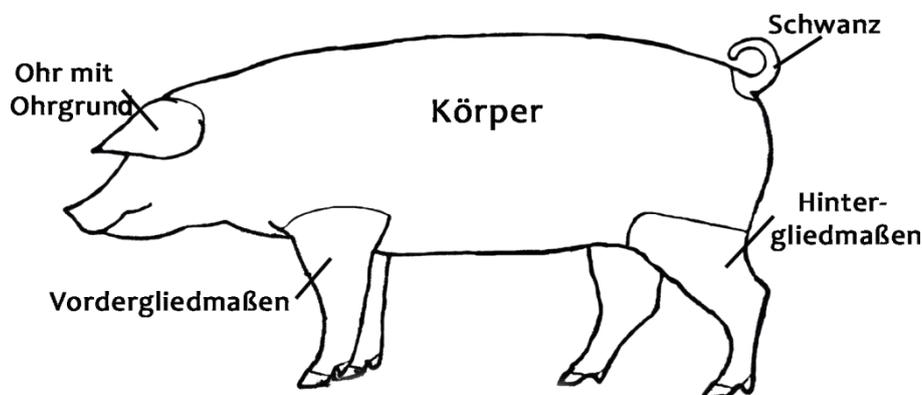


Abb. 35: Bonitierte Körperregionen des Schweins im Rahmen der Integumentbeurteilung (verändert nach PFLANZ, 2007)

3.7 Kostenberechnung / Wirtschaftlichkeitsberechnung

Dieser Themenbereich und die inhaltliche Darstellung wurden zum Teil auch im Rahmen der Abschlussarbeit „Wirtschaftsbetrachtung von Zuluftführungs- und Kühlungssystemen in der Schweinemast“ (HORSTAMNN, 2012) bearbeitet und hier übernommen.

Die **Kostenberechnung** fokussiert auf Mehrkosten, die die beschriebenen Kühlungssysteme verursachen und auf Kosteneinsparungen, welche mit den Systemen möglich sind. Hierzu wurden die Fixkosten, die variablen Kosten und die Arbeitskosten der Systeme berechnet. Die Fixkosten bestehen aus dem Anschaffungspreis bzw. den Baumehrkosten.

Hinzu kommen die variablen Kosten wie Wasser und Strom bei Kühlpad und Hochdruckbefeuchtung sowie die Wartungsarbeiten an den jeweiligen Systemen. Dies sind hauptsächlich Kontrollen verbunden mit der Reinigung von Filtern oder Düsen sowie die Zugabe von Chlortabletten beim Kühlpad. Diese verhindern die Algenbildung am Kühlpad und müssen ebenfalls bei der Kostenberechnung berücksichtigt werden. Die einzelnen Kostenpositionen sind in Tab. 19 aufgelistet. Die Baumehrkosten eines Mastplatzes mit Unterflurlüftung wurden anhand der KTBL (2013) für einen Maststall mit 385 Tierplätzen und Vollspaltenboden berechnet. Diese sind auf den Unterflurkanal in Bauteil C bezogen. Der Kanal aus Bauteil A wurde hier nicht berücksichtigt, da auch die Wärme und Kühlungsgewinne nicht genau berechnet werden können und so in die Rechnungen auch nicht mit einfließen. Weiterhin ist der Kanal in Bauteil A aufgrund seiner Größe nicht repräsentativ für die Praxis. Für eine Arbeitskraftstunde (Akh) werden nach KTBL Betriebsplanung Landwirtschaft (2012) 15 € Kosten festgelegt. Die Anschaffungskosten und die variablen Kosten wurden hinsichtlich des Kühlpads für ein Abteil berechnet. Obwohl zwei Abteile das Kühlpad nutzen, wurde die Kosten für Wartung und Verbrauchsmaterialien komplett dem Versuchsabteil zugeschlagen.

Tab. 19: Kosten der Kühlungssysteme bezogen auf ein Abteil und Jahr.

Abteil (125 TP)	Kaufpreis / Baukosten	Wartung im Jahr		Ver- brauchs- material	Variable Kosten		Nutz- ungs- dauer
		Zeit	Kosten		Was- ser	Strom	
	[€]	[Akh]	[€]	[€]			[a]
Kühlpad	961,35	13,5	202,50	9,60	ja	ja	10
Hochdruck- befeuchtung	3891,62	9	135,00	-	ja	ja	10
Unterflurzu- luftführung	9095,95	-	-	-	ja	nein	25

Die Systeme Hochdruckbefeuchtung und Kühlpad sind in Eigenleistung errichtet worden, sodass die Arbeitskosten hierfür nicht berücksichtigt werden können. Auch die zwei 1000 l Wasserbehälter für das Kühlpad waren an der LSZ Boxberg schon vorhanden und fließen in die Kostenberechnung nicht mit ein.

Am Ende einer jeder Untersuchung steht die Frage der **Wirtschaftlichkeit** des getesteten Systems. Diese lässt sich über eine Sensitivitäts- oder Szenarioanalyse betrachten.

Eine Sensitivitätsanalyse beschreibt das Verhalten einer Zielgröße bei Veränderung von genau einer Variablen. Alle anderen die Zielgröße beeinflussenden Variablen bleiben bei der Sensitivitätsanalyse konstant. Diese Voraussetzung wird als *ceteris paribus* bezeichnet. Das Ergebnis einer solchen Analyse bringt also hervor, wie wichtig oder unwichtig ein einzelner Faktor für das Gesamtergebnis ist (MUßHOFF & HIRSCHAUER, 2011). Die Untersuchung eines Kühlsystems für Mastställe anhand einer Sensitivitätsanalyse könnte also Aussagen darüber ermöglichen, welchen Einfluss beispielsweise die Entwicklung der Schlachtschweinepreise auf die Rentabilität des Systems hat.

Ein weiterer Aspekt der Sensitivitätsanalyse ist die Ermittlung von kritischen Werten. Der kritische Wert einer Variablen ist genau dann erreicht, wenn die Zielgröße den Wert 0 annimmt. Damit wäre die sogenannte Rentabilitätsschwelle erreicht (MUßHOFF & HIRSCHAUER, 2011).

Die Sensitivitätsanalyse ermöglicht demnach zwar die genaue Betrachtung einzelner Parameter, sie lässt aber nicht die Evaluation ganzer Systeme zu. Deshalb ist für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Kühlsysteme in der vorliegenden Arbeit die Szenarioanalyse die sinnvollere Alternative.

Bei einer **Szenarioanalyse** werden unterschiedliche „Entwicklungspfade, die zu möglichen Zukunftsbildern hinführen“ (ODENING & BOKELMANN, 2000), aufgezeigt. Ein Entwicklungspfad meint dabei ein bestimmtes Szenario, das durch bestimmte Erwartungen an die eingesetzten Variablen charakterisiert ist. Das Zukunftsbild ist das Ergebnis, das bei den angenommenen Werten für die jeweiligen Variablen erzielt wird.

Üblicherweise werden drei verschiedene Szenarien entwickelt: Ein positives und ein negatives Extremszenario sowie ein Trendszenario (ODENING & BOKELMANN, 2000). Die beiden Extremszenarien dienen dazu, die erzielten Ergebnisse nach oben und unten abzusichern, das heißt, den ungünstigsten sowie den günstigsten Fall abzubilden. Sollte für beide Extremszenarien das gleiche Ergebnis erreicht werden, kann eine eindeutige Aussage getätigt werden. Da dies nicht immer der Fall ist, wird als drittes Szenario ein sogenanntes Trendszenario angenommen. Die für die Variablen eingesetzten Werte sind dabei diejenigen Werte, die mit der größten Wahrscheinlichkeit eintreffen. (ODENING & BOKELMANN, 2000) Das Trendszenario ist folglich das realistischste Szenario.

Dabei wurden für Strom und Gas ein Trendszenario und ein negatives Extremszenario durchgeführt (siehe Gleichung **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die daraus resultierenden Ergebnisse werden dann in einem weiteren Szenario für Schlachtpreise eingesetzt. Berechnet wird die nötige erhöhte Tageszunahme, um die gegebenenfalls entstandenen Zusatzkosten der Kühlungs- und Lüftungssysteme auszugleichen. Der Faktor Gaspreis spielt nur bei der Unterflurzuluft eine Rolle. Dieser ist dazu nötig, um die eingesparte Heizenergie zu quantifizieren. Hierbei geht man im Negativszenario davon aus, dass beide Energiekosten ansteigen. Dabei wird System Unterflurzuluft die Wärmeenergiegewinnung einmal mit einbezogen und einmal nicht. Dies würde die Situation darstellen, dass die Tiere immer so eingestallt würden, dass so gut wie keine Heizkosten anfallen würden. In allen Berechnungen des Abteils Unterflurzuluft sind die Ersparnisse des geringeren Stromverbrauchs der Lüfter einbezogen. Diese wurden aus der Differenz zwischen durchschnittlichen Stromkosten der Lüfter des Referenzabteils und den durchschnittlichen Stromkosten der Lüfter des Unterflurzuluftabteils ermittelt.

Die Energiepreise sowie die Berechnungsdaten zur Trendanalyse wurden den Angaben des STATISTISCHEN BUNDESAMTS (2013) entnommen (siehe Abb. 36).

5.9.1 Strom - Indizes

Berichts- jahr	Berichtsmonat												Jahres- durch- schnitt
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	

Index der Verbraucherpreise

2010 = 100

	COICOP 0451015 Elektrischer Strom bei Abgabe an private Haushalte												
2000 ...	62,1	62,1	62,1	62,0	61,9	61,9	61,9	61,8	62,0	62,2	62,4	62,5	62,1
2001 ...	64,1	64,4	64,4	64,4	64,5	64,6	64,7	64,7	64,7	64,7	64,7	64,8	64,6
2002 ...	67,4	67,4	67,4	67,4	67,4	67,5	67,5	67,5	67,5	67,7	67,7	67,7	67,5
2003 ...	70,5	70,6	70,6	70,7	70,7	70,7	70,8	70,9	71,0	71,1	71,2	71,2	70,8
2004 ...	73,3	73,5	73,5	73,7	73,7	73,7	73,8	73,8	73,8	73,9	73,9	73,9	73,7
2005 ...	76,2	76,5	76,6	76,7	76,9	76,9	77,0	77,0	77,0	77,0	77,0	77,0	76,8
2006 ...	79,4	79,5	79,5	79,6	79,8	79,8	79,9	80,0	80,0	80,0	80,0	80,1	79,8
2007 ...	84,0	84,4	84,5	84,6	84,6	84,7	85,4	85,5	86,0	86,5	86,7	86,8	85,3
2008 ...	90,2	90,5	90,5	90,8	90,9	90,9	91,2	91,6	91,8	92,0	92,0	92,1	91,2
2009 ...	95,0	95,7	96,3	97,0	97,2	97,2	97,2	97,3	97,4	97,4	97,4	97,4	96,9
2010 ...	98,7	98,9	99,3	99,6	100,0	100,0	100,2	100,5	100,5	100,7	100,7	100,8	100,0
2011 ...	105,7	106,3	106,8	107,2	107,6	107,6	107,6	107,6	107,6	107,6	107,6	107,7	107,2
2012 ...	108,9	109,1	109,5	110,0	110,1	110,4	110,6	110,9	110,9	111,0	111,0	111,1	110,3
2013 ...	122,1	122,6	123,1										

5.3.1 Erdgas - Indizes

Berichts- jahr	Berichtsmonat												Jahres- durch- schnitt
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	

Index der Verbraucherpreise

2010 = 100

	COICOP 0452130 Erdgas, bei Abgabe an private Haushalte												
2000 ...	56,1	56,3	56,5	60,0	60,8	61,6	62,5	63,7	64,0	67,0	68,4	69,0	62,2
2001 ...	75,0	76,0	76,3	76,7	77,0	76,8	76,3	76,3	76,4	74,3	74,2	74,1	75,8
2002 ...	73,0	72,9	72,8	71,5	71,1	71,1	70,9	70,9	70,9	70,6	70,6	70,5	71,4
2003 ...	74,3	74,4	74,4	74,6	74,8	75,0	75,4	75,5	75,7	75,9	75,9	75,9	75,2
2004 ...	75,6	75,5	75,5	75,4	75,3	75,2	75,2	75,4	75,7	77,2	77,6	77,9	76,2
2005 ...	80,9	81,3	81,3	81,6	81,8	81,9	82,9	83,8	85,0	89,4	89,8	89,9	85,5
2006 ...	96,7	97,3	97,3	98,1	98,5	98,6	98,8	98,9	99,2	102,7	103,4	103,4	100,2
2007 ...	105,9	105,9	105,8	102,2	101,7	101,7	101,1	101,0	100,6	100,9	100,8	100,8	102,2
2008 ...	104,2	104,3	104,4	105,8	106,5	107,0	109,2	111,4	115,0	122,8	123,6	123,9	113,3
2009 ...	125,3	124,3	123,5	110,8	110,2	109,7	105,4	104,3	103,8	100,3	100,0	99,0	105,0
2010 ...	99,3	99,4	99,4	99,6	99,7	99,7	99,7	99,9	100,0	101,0	101,1	101,2	100,0
2011 ...	102,3	102,6	102,7	102,8	103,1	103,1	103,7	104,4	105,7	107,9	108,3	108,5	104,6
2012 ...	109,4	109,8	109,8	109,8	109,9	109,9	109,9	110,3	110,7	110,8	110,8	110,9	110,2
2013 ...	111,3	111,3	111,4										

Abb. 36: Indexberichte der Verbraucherpreise von den Jahren 2000 bis 2013 für: Strom (oben); Erdgas unten (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2013)

Aus den Indexwerten wurde der Negativfaktor berechnet. Dieser betrug für Strom und für Gas (siehe Gleichung (10)).

$$Faktor_{negativ} = \frac{Index_{Feb\ 2013}}{Index_{Feb\ 2003}} \quad (10)$$

$$Faktor_{negativ} = \frac{Strom\ 122,6}{70,6} = 1,7365$$

$$Faktor_{negativ} = \frac{Erdgas\ 111,3}{72,9} = 1,4960$$

Mittels der berechneten Faktoren wurden im Folgenden die Preise zur späteren Kostenberechnung ermittelt:

Strompreis

Positiv-Wert (Ist-Wert) = 0,19 €/kWh

Negativ-Wert = 0,33 €/kWh

$$\text{Negativ Wert} = \text{Ist - Wert} * \text{Faktor}_{\text{negativ}} \quad (11)$$

$$\text{Negativ Wert} = 0,19 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * 1,7365 = 0,33 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Trend-Wert = 0,26 €/kWh

$$\text{Trend Wert} = \frac{\text{Positiv Wert} + \text{Negativ Wert}}{2}$$

$$\text{Trend Wert} = \frac{0,19 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} + 0,33 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}}{2} = 0,26 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Erdgaspreis

Positiv-Wert (Ist-Wert) = 0,06 €/kWh

Negativ-Wert = 0,09 €/kWh

$$\text{Negativ Wert} = \text{Ist - Wert} * \text{Faktor}_{\text{negativ}} \quad (11)$$

$$\text{Negativ Wert} = 0,06 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * 1,4960 = 0,09 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Trend-Wert = 0,07 €/kWh

$$\text{Trend Wert} = \frac{\text{Positiv Wert} + \text{Negativ Wert}}{2}$$

$$\text{Trend Wert} = \frac{0,06 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} + 0,09 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}}{2} = 0,07 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

3.8 Strömungssimulation

Ergänzend zu den Stallklimamessungen an der LSZ Boxberg wurden Strömungssimulationen im Referenzabteil (C1) mit Porendeckenzuluft und im Stallabteil mit Unterflurzuluft (C3) durchgeführt. Hierbei wurde nicht die exakte Wiedergabe der Strömung in den Ver-

suchszeiträumen angestrebt, sondern die Darstellung typischer Strömungsmuster in den beiden Zuluftsystemen in der Sommer- und Wintersituation. Zusätzlich erfolgten Simulationen zur Optimierung der Luftführung. Des Weiteren wurden methodische Untersuchungen zur Modellierung der Porendecke und zum Einfluss der Wärmeproduktion der Tiere auf die Strömung durchgeführt, um diese möglichst realitätsnah nachzubilden. Diese Ausarbeitung basiert zum Teil auf der Abschlussarbeit „Simulation der Luftströmung in Mastschweineeställen mit unterschiedlichen Zuluftführung“ (ADRION, 2012) und wurde hier übernommen.

3.8.1 Software

Als Löser für die Strömungsberechnungen wurde die Software *ANSYS Fluent 14.0* (ANSYS Inc.) verwendet. Die Modell- und Gittererstellung und die Auswertung der Ergebnisse wurden mit den Anwendungen *DesignModeler*, *Meshing* und *CFD-Post* im *ANSYS Academic Research CFD* Paket (ANSYS Inc.) durchgeführt.

3.8.2 Stallmodelle und Diskretisierung

Für die Simulationen wurden vereinfachte Modelle der beiden Stallabteile erstellt, wobei jeweils nur das Fluidvolumen konstruiert wurde (Abb. 37). Der Güllekeller und der Spaltenboden wurden nicht berücksichtigt. Ebenso wurde das Unterflurkanalsystem, durch das die Zuluft vor dem Eintritt in das Unterflurabteil strömt, nicht in das Modell integriert. Ausschließlich der Zuluftkanal unter dem Kontrollgang des Abteils wurde modelliert. Dort wurde an der rückwärtigen Seite des Abteils ein quer verlaufendes Güllerohr am Boden des Kanals mit 0,25 m Durchmesser an seiner realen Position eingesetzt.

Im Unterflurzuluftabteil wurde der Abluftkasten unterhalb des Abluftschachtes in das Modell integriert, der einen Kurzschluss mit der im Versorgungsgang aufwärts strömenden Zuluft verhindern sollte.

Die Porendecke und der Spaltenboden im Zentralgang des Unterflurabteils wurden für die Simulationen stark vereinfacht. So wurde die Öffnungsfläche der Porenplatten im Modell auf neun Öffnungen an Stelle von 180 Öffnungen pro Platte verteilt, um eine zu hohe Zahl an Gitterelementen zu vermeiden. Auch die Anzahl der Öffnungen des Spaltenbodens wurde im Modell von 21 auf 6 pro Spaltenelement verringert.

Als Tiermodelle wurden je Bucht 21 Zylinder gleichmäßig verteilt (BÜSCHER, 1991). Die Maße der Zylinder wurden an das Tiergewicht durch Berechnung der Körperoberfläche der eingestellten Schweine nach BRUCE & CLARK (1979) angepasst.

Die Stallmodelle wurden für die Gittererstellung und die Strömungsberechnungen mit einer Symmetrieebene in der Mitte des Zentralganges halbiert. Aus diesem Grund ist bei der Erläuterung der Vernetzung und der Ergebnisse nur die in Abb. 37 mit Tiermodellen ausgestattete linke Hälfte der Abteile dargestellt.

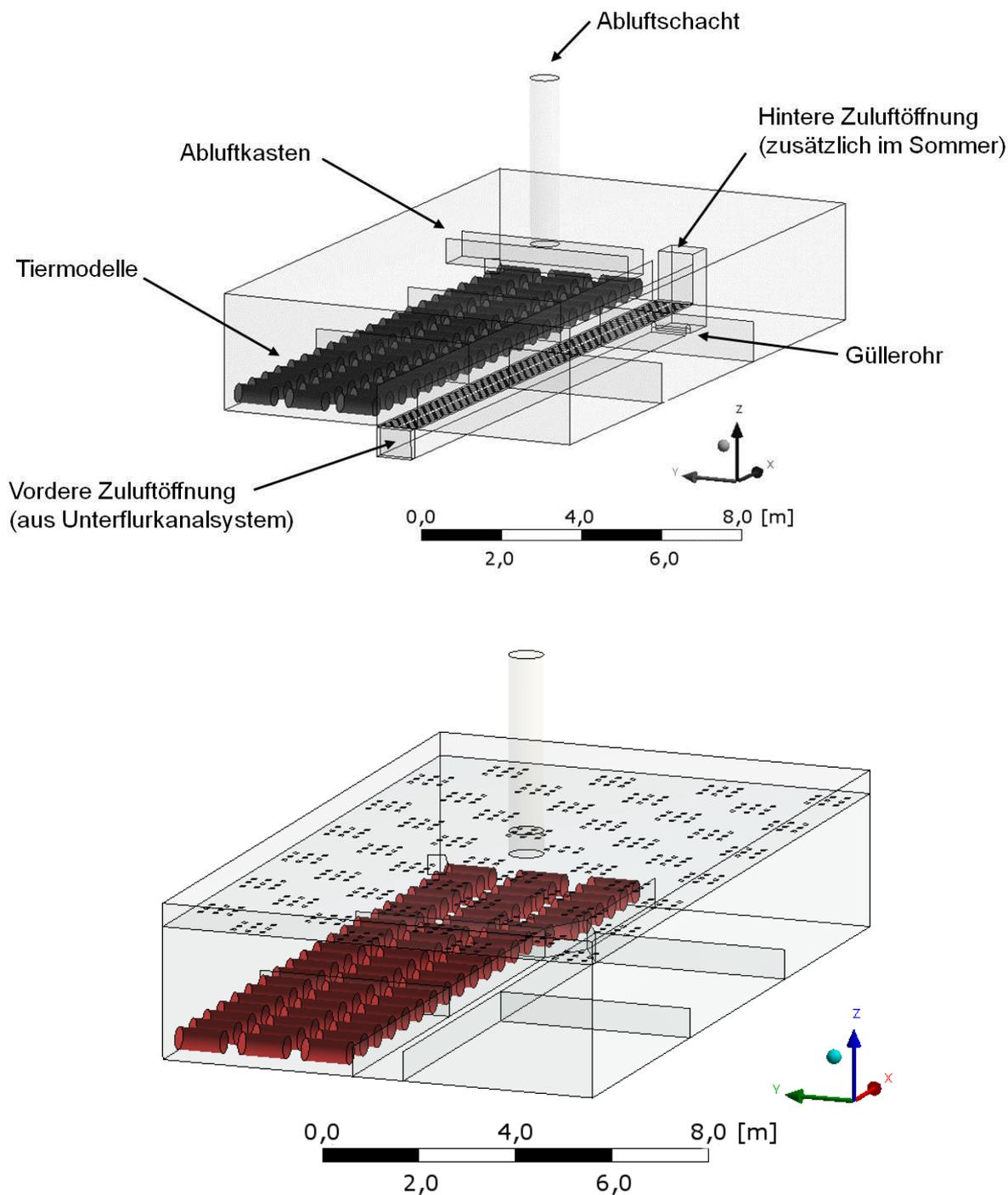


Abb. 37: Modell des Abteils mit Unterflurzuluft (oben) und des Abteils mit Porendeckenzuluft (unten) (ADRION, 2013)

Zur Diskretisierung des Strömungsgebietes wurde in beiden Modellen ein Raumgitter aus Tetraedern erstellt. Beispielhaft für beide Abteile ist in Abb. 38 ein Ausschnitt des Gitters im Unterflurzuluftabteil in der Sommersituation dargestellt. Die Gitterqualität wurde anhand von Orthogonalität und Aspect Ratio kontrolliert (ANSYS Inc., 2012).

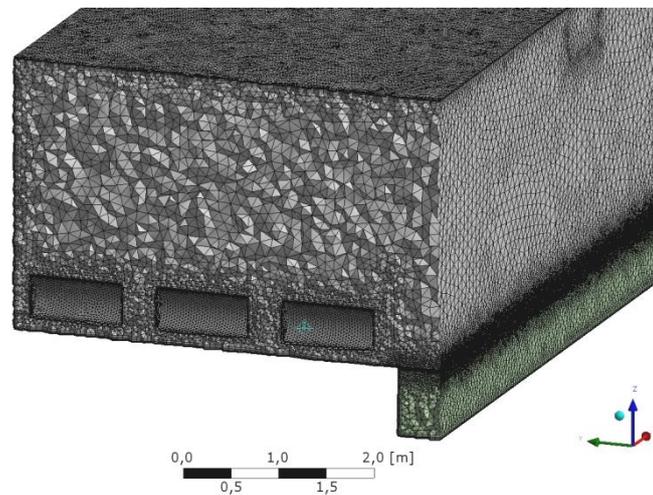


Abb. 38: Ausschnitt des Raumgitters im Modell des Unterflurzuluftabteils (ADRION, 2013).

3.8.3 Datengrundlage und Randbedingungen

Als Grundlage für die Simulation von Winter- und Sommerbedingungen in den Abteilen wurden zwei zehnmündige Messintervalle mit je 20 Einzelmessungen ausgewählt (13.02.2011 00:55 - 01:05 Uhr und 04.07.2011 13:55 - 14:05 Uhr). Die Messpunkte befanden sich im Dachraum, im Unterflurkanal, in den Abteilen und Abluftschächten sowie in der Außenluft. Die Mediane der Messdaten dienten als Randbedingungen für Einlasstemperatur, Volumenstrom sowie Differenzdruck zwischen Abteil und Außenluft (Tab. 20).

Der Volumenstrom wurde in den Simulationen über die Angabe einer festen Geschwindigkeit am Auslass des Abluftschachtes festgelegt. Als Einlass mit entsprechender Lufttemperatur dienten die obere Fläche des angedeuteten Dachraumes im Porendeckenabteil bzw. die Eingangsflächen des Unterflurkanals. Die Druckdifferenz zwischen Stall und Außenluft wurde in den Simulationen mit Hilfe von sogenannten porösen Sprüngen (definierter Druckverlust) auf den Öffnungsflächen der Porendecke, des Spaltenbodens im Zentralgang des Unterflurzuluftabteils und am Eingang des Unterflurkanals realisiert (Tab. 20). Der Differenzdruck im Stall ließ sich so mit einer Genauigkeit von 1 bis 4 Pa abbilden, was in etwa der Genauigkeit der Druckmesser entsprach.

Anhand der Lebendgewichte (LG) an den Versuchstagen wurde die konvektive Wärmeabgabe der Schweine nach dem Modell von BRUCE & CLARK (1979) berechnet. Die Wärmestrahlung wurde in den Simulationen jedoch nicht berücksichtigt. Für beide Abteile wurde in der Sommersituation ein Tiergewicht von 91 kg angenommen mit einer resultierenden konvektiven Wärmeleistung von 45,5 W pro Tier. In der Wintersituation betrug die Wärmeleistung der Tiere im Unterflurzuluftabteil 35,1 W (51 kg LG) und im Porendecken-

abteil 44,5W (79 kg LG). Diese wurde als konstanter Wärmefluss auf der Oberfläche der Tiermodelle in die Simulationen integriert. Andere Wärmequellen waren nicht zu berücksichtigen, da auch am Versuchstag im Februar in beiden Abteilen die Heizung nicht in Betrieb war.

Tab. 20: Randbedingungen der Strömungssimulationen.

Referenzabteil		
Parameter	Sommersituation	Wintersituation
Einlasstemperatur [°C]	22,0	4,2
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹]	8434	2262
Druckverlust Porendecke [Pa]	-37,7 ¹⁾	-5,6 ¹⁾
Wärmestrom Tiermodell [W m ⁻²]	24,3	23,8
Unterflurzuluftabteil		
Parameter	Sommersituation	Wintersituation
Einlasstemperatur Unterflurkanal [°C]	19,1	8,6
Einlasstemperatur außen [°C]	22,1	-
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹]	9129	1990
Druckverlust Spaltenboden [Pa]	-9,7 ^{1) 2)}	-1,6 ¹⁾
Druckverlust Unterflurkanal [Pa]	-1,6 ^{1) 2)3)}	-0,5 ^{1) 4)}
Wärmestrom Tiermodell [W m ⁻²]	24,3	28,3

¹⁾ Berechneter Druckverlust des porösen Sprunges

²⁾ Summe beider Werte geringer als Messwert; Addition des im äußeren Zulufschacht entstehenden Druckverlustes ergibt Messwert

³⁾ Abweichung vom Messwert 4,1 Pa

⁴⁾ Abweichung vom Messwert 3,7 Pa

3.8.4 Validierung der Simulationsergebnisse

Die Genauigkeit der Strömungssimulationen muss durch einen Vergleich mit Messergebnissen ermittelt werden. Hierfür ist insbesondere für Daten zu Strömungsgeschwindigkeit und -richtung eine möglichst feine räumliche Auflösung der Messungen notwendig. Im Rahmen der durchgeführten Stallklimamessungen stand jedoch nur ein Sensor für Lufttemperatur und Strömungsgeschwindigkeit pro Abteil zur Verfügung. Aus diesem Grund wurden zusätzlich in jedem Abteil Messungen der Luftgeschwindigkeit mit einem tragbaren Hitzdrahtanemometer (TSI VelociCalc Plus 8386A) durchgeführt. Das Messraster bestand hierbei aus jeweils 18 Punkten in 0,5 m und 2,0 m Höhe. Diese Messmethode war geeignet, um über das gesamte Abteil Durchschnittswerte für die Strömungsgeschwindigkeit im

Tierbereich zu erhalten. Zusätzlich wurden Nebelproben in den Abteilen durchgeführt, um das gesamte Strömungsbild zu beurteilen. Eine exakte Validierung der Simulationsergebnisse mit einem Raster aus stationären Sensoren war im Rahmen dieses Projektes nicht möglich.

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Langzeitmessung im Hinblick auf die einzelnen Fragestellungen präsentiert. Im weiteren Verlauf werden dann je nach Fragestellung speziellen Jahreszeiträumen detaillierter aufgeschlüsselt, darunter unter anderem auch alle Werte, die bei Außentemperaturen von über 22°C gemessen wurden, sowie besonders warme Tage. Um den Effekt der Wärmegewinnung des Unterflurzuluftsystems und des Erdwärmetauschers zu bewerten, werden auch die Ergebnisse aus den Messungen in der kalten Zeit und der Übergangszeit vorgestellt.

Im Anschluss werden die Ergebnisse zu Stallklima, Strömungssimulation, Emissionsgeschehen, Tierwohl und Energieeffizienz / Wirtschaftlichkeit unter dem Gesichtspunkt der Praxisnutzung verglichen. Dabei wird das Referenzabteil als Standard festgelegt. Des Weiteren werden die Ergebnisse mit bestehenden Literaturwerten verglichen und bewertet.

4.1 Wetteraufzeichnungen

Das Außenklima stellt einen wichtigen Einflussfaktor auf das Stallklima dar. An dieser Stelle werden deshalb zunächst die Werte des Außenfühlers dargestellt. Der Verlauf der Temperaturkurve in Abb. 39 zeigt deutlich die Tagesschwankungen, aber auch, dass im Februar 2012 ein starker Kälteeinbruch stattfand. Weiterhin waren der Juli 2011 und der Juli 2012 kälter als der Monat davor und danach. In beiden Jahren wurden die höchsten Temperaturen im August erreicht.

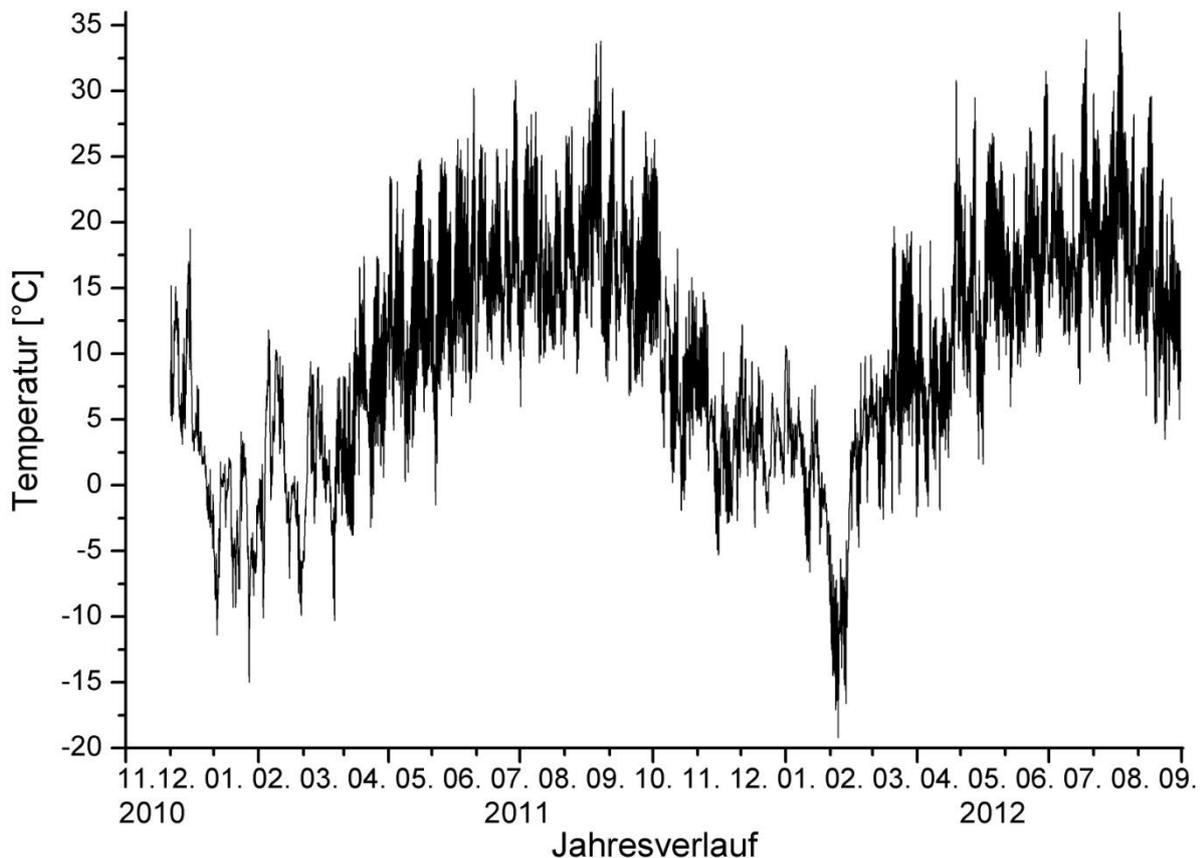


Abb. 39: Temperaturverlauf des Außenfühlers am Maststall der LSZ Boxberg.

Zur besseren Übersicht, besonders bezüglich der warmen Tage, wurden aus den Temperaturwerten Stundenmittelwerte gebildet. Auf diesen Daten basiert folgende Abb. 40. Sie zeigt, über wie viele Stunden eine gewisse Temperatur im Zeitraum von 01. November 2010 bis 30. September 2012 herrschte. Die Abstufungen der Temperaturen betragen jeweils 0,1 Kelvin von -20°C bis $+36^{\circ}\text{C}$. Dabei zeigte sich, dass 96 Stunden die Durchschnittstemperatur der Außenluft unterhalb der Wintertemperaturzone lag, für die der Stall eigentlich ausgelegt war. Dies sind nach der DIN 18910 -12°C . Die besagte Temperatur wurde in den 16776 gemessenen Stunden 105-mal für je eine Stunde unterschritten. Temperaturen größer 30°C wurden im Messzeitraum 82-mal erreicht. Eine Temperatur größer 22°C wurde in 1370 Stunden, also 8,17%, der Zeit, gemessen.

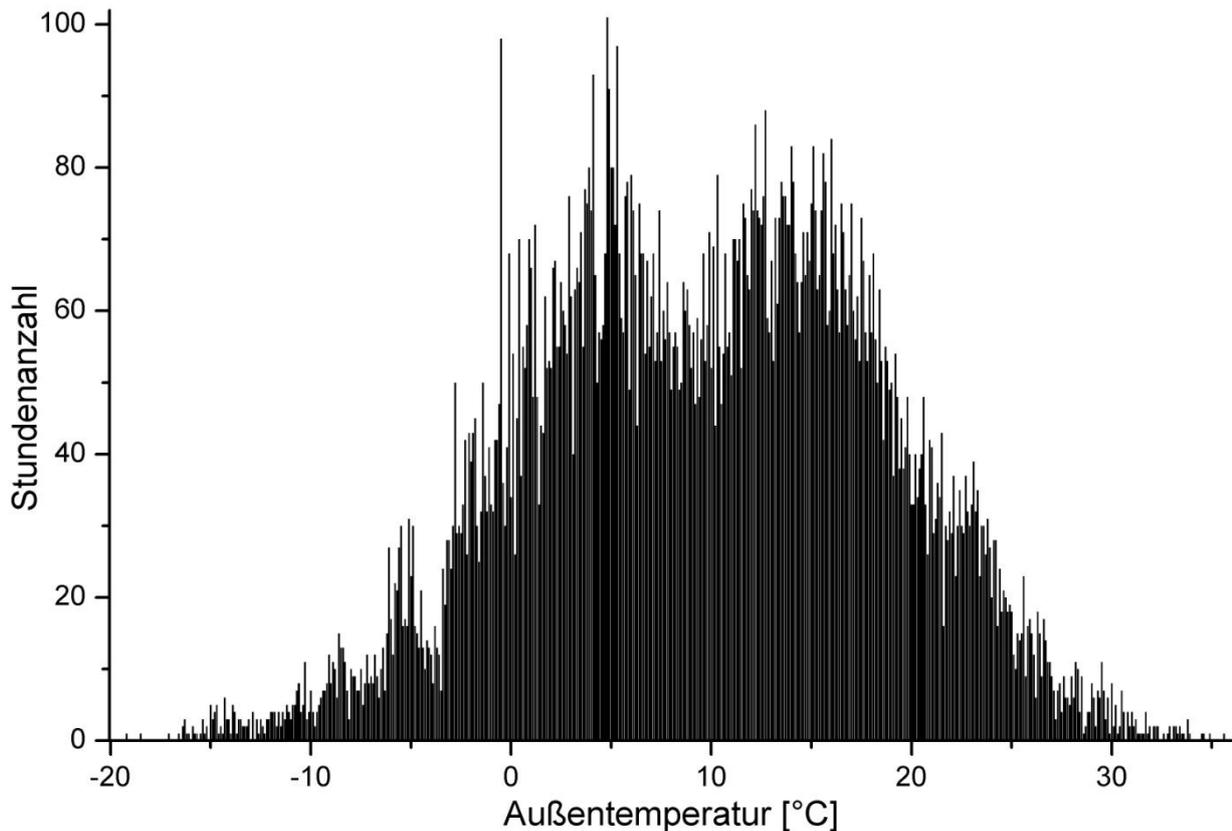


Abb. 40: Anzahl der Stunden, in denen eine bestimmte Temperatur vorherrschte. Messzeitraum 01.11.2010 - 30.09.2012 (entspricht 16776 Stunden, Abstufung der Außentemperatur 0,1 K).

4.2 Stallklima

4.2.1 Ergebnisse der Stallklimamessung

Das Stallklima setzt sich aus unterschiedlichen Faktoren zusammen. Im Folgenden werden die Messergebnisse der für die Tiere wichtigsten Einflussgrößen präsentiert. Die Messwerte zeigen den Einfluss des Lüftungssystems auf das Stallklima und ermöglichen eine Beurteilung der Systeme im Hinblick auf die Schaffung eines optimalen Klimabereiches für die Tiere.

4.2.1.1 LSZ Boxberg

4.2.1.1.1 Zeitraum 2011 – 2012

Zur Übersicht über die Jahre 2011 und 2012 wurden die Tagesmittelwerte zur Erstellung der Boxplots in den folgenden Abbildungen genutzt. Die Auswertungen des Jahres 2012 beinhalten die Monate Januar bis September. Das Jahr 2011 ist vollständig abgebildet.

Abteilterperatur

Im Gegensatz zur Außentemperatur zeigt die Abteilterperatur über den Messzeitraum eine wesentlich geringere Schwankung, was typisch für zwangsbelüftete Ställe mit einer Stallklimaregelung ist. In Abb. 41 sind die Tagesdurchschnittswerte für die zwei besagten Jahre dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Mediane der Abteilterperaturen Differenzen von weniger als 2 Kelvin aufweisen. Die höchsten Werte wurden in beiden Jahren beim Referenzabteil ohne Kühlungsmöglichkeiten gemessen.

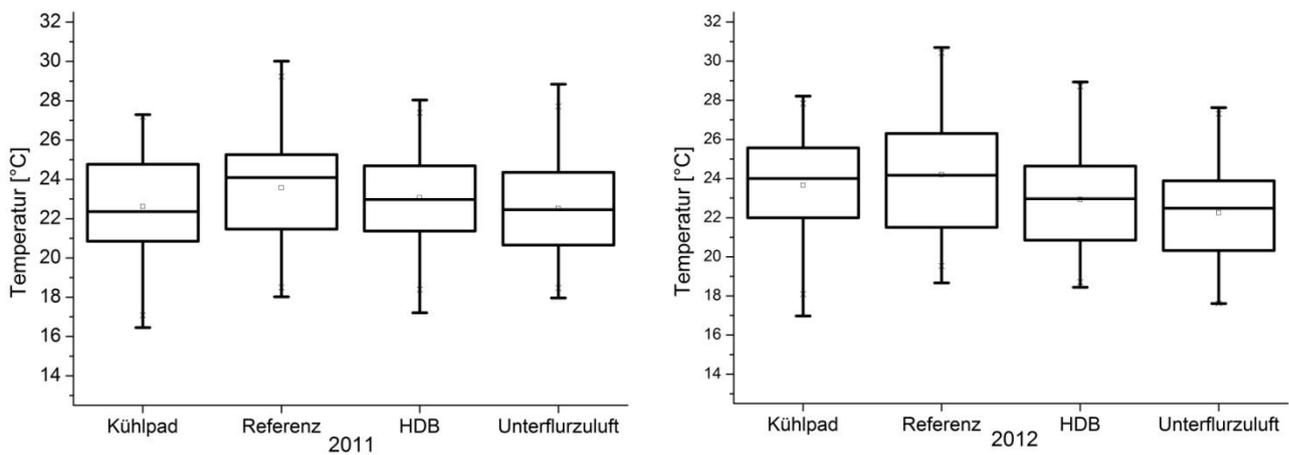


Abb. 41: Tagesdurchschnittstemperaturen jeweils in den vier Mastschweineabteilen. Links: Jahr 2011 Jan. – Dez. n >200 d , rechts: Jahr 2012 Jan. – Sep. n >175 d. (HDB = Hochdruckbefeuchtung)

Relative Luftfeuchte

Die Werte der relativen Luftfeuchtigkeit in den Abteilen mit Befeuchungskühlung lagen höher als bei den anderen zwei Abteilen. Es lässt sich auch der Einfluss einer optimierten Einstellung der Regeltechnik des Kühlpads in den Jahren 2011 zu 2012 erkennen. Diese wurde im Jahr 2012 auf einen Maximalwert von 80% relative Luftfeuchte im Abteil begrenzt und ein Einschalten erst ab einer Außentemperatur von 24°C eingestellt (2011 keine Begrenzung der rel. Luftfeuchte und Einschalten ab einer Außentemperatur von 21 °C). So sanken die Spitzenwerte von über 90% relative Luftfeuchte auf 80% relative Luftfeuchte. Die größten Schwankungen sind bei der Unterflurlüftung im Jahr 2012 zu verzeichnen (siehe Abb. 42).

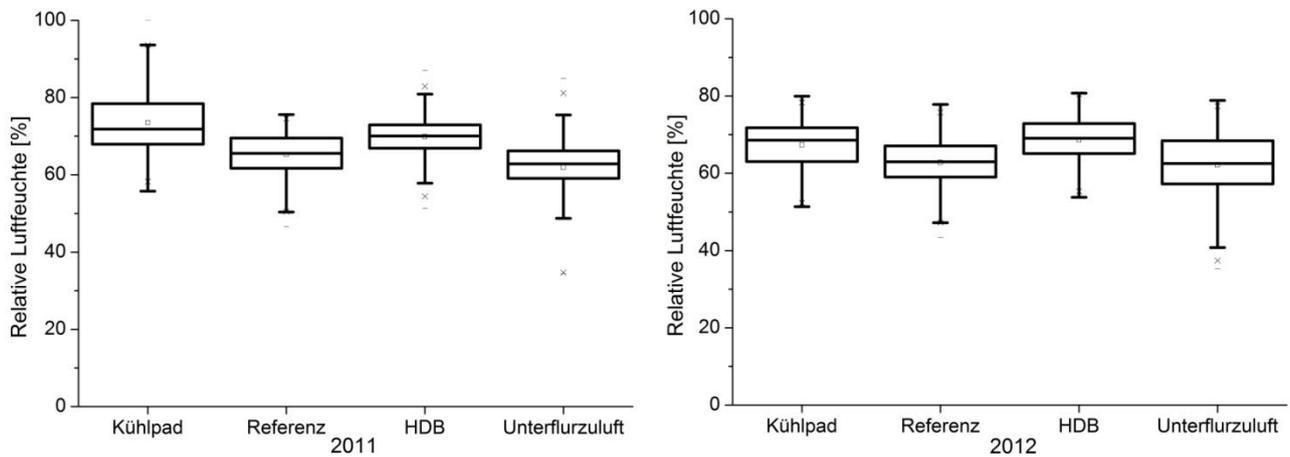


Abb. 42: Tagesdurchschnittswerte der relativen Luftfeuchtigkeit. Links: Jahr 2011 Jan. – Dez. $n > 200$ d, rechts: Jahr 2012 Jan. – Sep. $n > 175$ d. (HDB = Hochdruckbefeuchtung)

Luftvolumenstrom

In der Abb. 43 ist deutlich sichtbar, dass im Jahr 2012 die kühlen Monate Oktober bis Dezember fehlen und hierdurch die Verteilung der Werte für den Luftvolumenstrom in einem höheren Bereich liegt als im Jahr 2011. Allgemein zeigt sich, dass das Referenzabteil und die Unterflurlüftung die höchsten Luftvolumenströme aufweisen, wobei die Unterflurlüftung im Jahr 2012 mit knapp $10000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ die höchsten Werte erreichte. Dahingegen traten im Kühlpadabteil speziell im Jahr 2011 seltener hohe Luftvolumenströme auf. Des Weiteren ist bei der Unterflurlüftung im Jahr 2011 zu erkennen, dass der Mittelwert und der Median höher lagen als die der anderen drei Abteile. So sank der Wert selten unter $3000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Auf den Tierplatz bezogen wurden Schwankungen im Jahr 2011 zwischen einer Mindestluftrate im Kühlpadabteil von $\sim 7,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ TP}^{-1}$ und einer Maximalluftrate im Referenzabteil von $\sim 71,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ TP}^{-1}$ gemessen. Im Jahr darauf war wieder die Mindestluftrate im Kühlpadabteil mit $\sim 7,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ TP}^{-1}$ am geringsten. Die maximale Luftrate wurde 2012 mit einem Wert von $78 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ TP}^{-1}$ im Unterflurabteil gemessen.

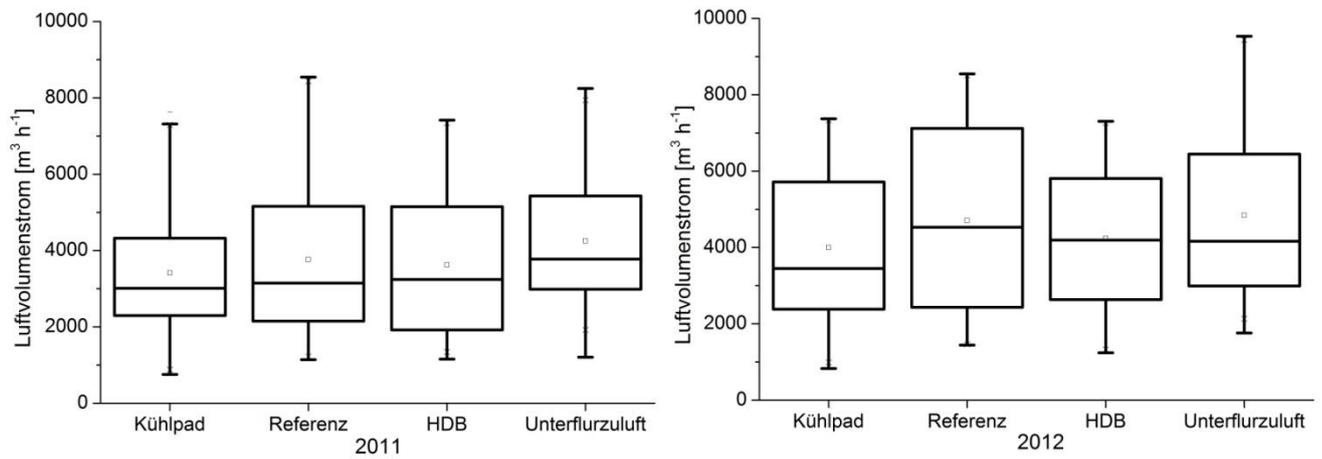


Abb. 43: Tagesdurchschnittswerte des Luftvolumenstroms. Links: Jahr 2011 Jan. – Dez. $n > 200$ d, rechts: Jahr 2012 Jan. – Sep. $n > 175$ d. (HDB = Hochdruckbefeuchtung, 125 Tiere je Abteil)

Luftgeschwindigkeit

Bei den Luftgeschwindigkeiten im Tierbereich zeigt sich, dass diese im Unterflurzuluftabteil allgemein niedriger waren als in den anderen Abteilen (siehe Abb. 44). Im Jahr 2012 wurden im Abteil mit Hochdruckbefeuchtung die höchsten Werte erreicht.

Die Dauermessungen wurden nur mit einem Strömungssensor pro Abteil durchgeführt. Für detailliertere Angaben zur Strömungsgeschwindigkeit wird an dieser Stelle auf die Strömungssimulationen verwiesen (Kapitel 4.8). Diese stellen die Luftgeschwindigkeit modellhaft für den gesamten Abteilraum dar. Auch manuelle Luftgeschwindigkeitsmessungen zur Validierung der Simulationen sind dort dargestellt.

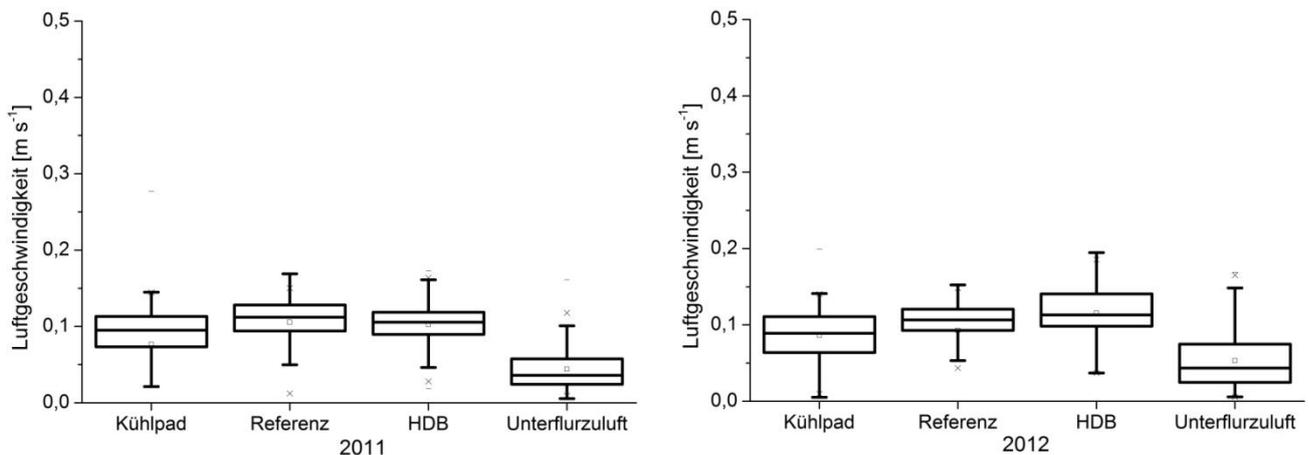


Abb. 44: Tagesdurchschnittswerte für Luftgeschwindigkeit im Tierbereich (75 cm Höhe). Links: Jahr 2011 Jan. – Dez. $n > 200$ d, rechts: Jahr 2012 Jan. – Sep. $n > 175$ d. (HDB = Hochdruckbefeuchtung)

Differenzdruck

Deutliche Unterschiede zwischen den Abteilen mit Porendecke und der Unterflurzuluft sind in den Differenzdruckmessungen in Abb. 45 zu sehen. So lagen die niedrigsten Tagesmittelwerte der Unterflurzuluft über -20 Pa. Den höchsten Unterdruck hingegen wies das Referenzabteil auf. An zweiter Stelle stand das Abteil mit dem Kühlpad. Speziell im Jahr 2011 unterschieden sich die Mediane nur gering bei Kühlpad, Referenzabteil und Hochdruckbefeuchtung. Im Vergleich zum Jahr 2012 wurden insgesamt geringere Differenzdrücke gemessen. Im Jahr 2012 wurden die kalten Monate (Okt. – Dez.) nicht mehr gemessen, wodurch der Durchschnitt des Unterdrucks höher ausfällt.

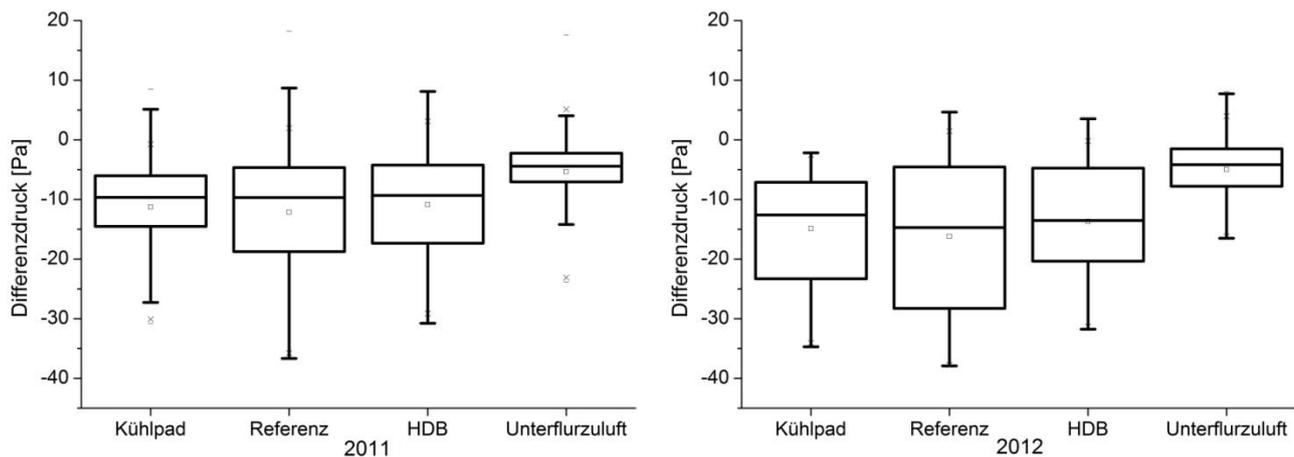


Abb. 45: Tagesmittelwerte des Differenzdrucks im Abteil. Links: Jahr 2011 Jan. – Dez. n >200 d, rechts: Jahr 2012 Jan. – Sep. n >175 d. (HDB = Hochdruckbefeuchtung)

4.2.1.1.2 Werte aus dem Messzeitraum mit einer Außentemperatur größer 22°C

Ab einer Außentemperatur von 22°C waren alle drei Kühlungssysteme meist aktiv (siehe Kapitel 3.1.1.3). Im Folgenden werden aus diesem Grund speziell Messergebnisse von Tagen dargestellt, die diese Bedingung erfüllen. Dies waren 2011 82 Tage mit einer durchschnittlichen Außentemperatur von 24,73°C und 2012 74 Tage mit durchschnittlich 25,44°C. Es wird insbesondere Bezug genommen auf Temperatur, relative Luftfeuchte, Differenzdruck und Luftvolumenstrom.

Abteilterperatur

Das Referenzabteil zeigte in beiden Jahren eine höhere Innentemperatur als die drei gekühlten Abteile. Insgesamt war bei allen Abteilen die Raumtemperatur im Jahr 2012 höher als im Jahr 2011, was auf die etwas höheren Außentemperaturwerte im Jahr 2012 zurückzuführen ist. Die Unterschiede zwischen den Kühlungssystemen waren speziell im Jahr

2011 sehr gering (siehe Abb. 46). Die Mediane der Abteillinnentemperatur lagen maximal 0,3 K auseinander. Die geringste Schwankungsbreite wies die Temperatur im Abteil mit dem Kühlpad auf. Im Jahr 2012 waren die Unterschiede zwischen den Kühlungssystemen größer als im Jahr 2011. Dabei wies das Abteil mit der Unterflurlüftung die geringsten Werte auf.

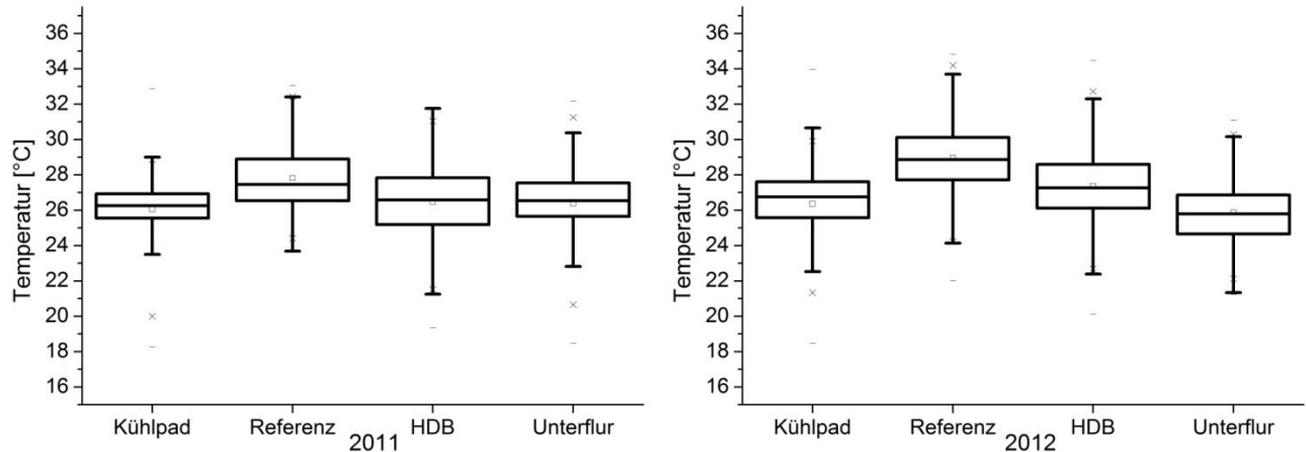


Abb. 46: Temperaturwerte im Abteil bei einer Außentemperatur $>22^{\circ}\text{C}$. Links: Jahr 2011 Jan. – Dez. ($n > 652$ h), rechts: Jahr 2012 Jan. – Sep. ($n > 700$ h). (HDB = Hochdruckbefeuchtung)

Relative Luftfeuchte

Bei der relativen Luftfeuchte zeigt sich das Bild, das bei der Jahresübersicht erkennbar ist, noch deutlicher. Die zwei auf Befeuchungskühlung basierenden Systeme verursachen eine höhere relative Luftfeuchte als die beiden anderen Systeme. Hierbei lagen die Werte des Kühlpadabteils im Jahr 2011 zum Großteil über 80% (siehe Abb. 47). Aber auch im Jahr 2012 lag das Kühlpadabteil mit einem Median der relativen Luftfeuchte von 72,7% weit über der Hochdruckbefeuchtung (67,3%), der Unterflurzuluft (62,7%) und dem Referenzabteil (56,6%).

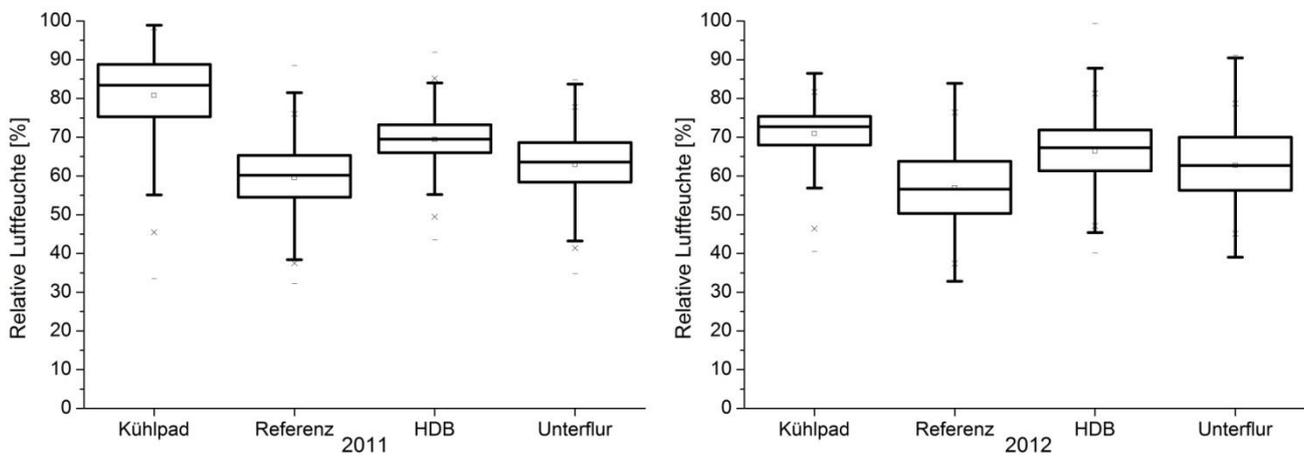


Abb. 47: Messwerte der relativen Luftfeuchtwerte im Abteil bei einer Außentemperatur $>22^{\circ}\text{C}$. Links: Jahr 2011 Jan. – Dez. ($n > 652$ h), rechts: Jahr 2012 Jan. – Sep. ($n > 700$ h). (HDB = Hochdruckbefeuchtung)

Luftvolumenstrom

Betrachtet man die Mediane des Luftvolumenstroms, benötigte das Referenzabteil den höchsten Volumenstrom. Zugleich sind aber auch die hohen Schwankungen der Messwerte in den einzelnen Abteilen gut zu erkennen. Diese waren bei der Unterflurlüftung in beiden Jahren am höchsten. Zusätzlich waren auch die Maximalwerte bei der Unterflurlüftung am höchsten (siehe Abb. 48). Einen starken Einfluss auf den benötigten Luftvolumenstrom hat das Alter und damit das Gewicht der im Abteil befindlichen Tiere. Das Ausstallen von schweren Tieren und das anschließend erneute Einstallen von leichten Tieren führt in kurzer Zeit zu einem großen Sprung der Luftvolumenstromwerte (siehe Abb. 12).

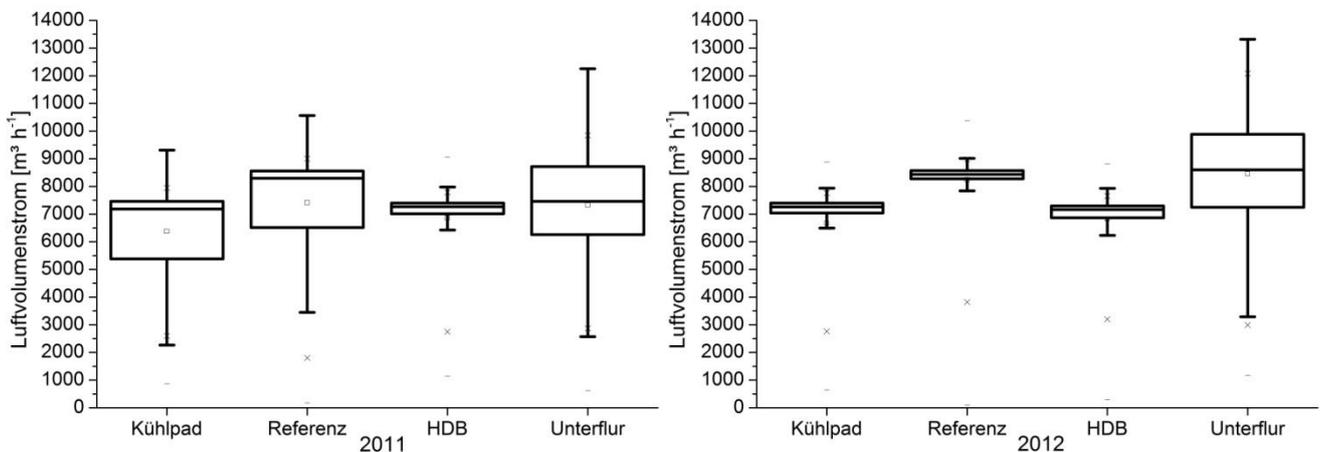


Abb. 48: Luftvolumenstrom pro Abteil bei einer Außentemperatur $>22^{\circ}\text{C}$. Links: Jahr 2011 Jan. – Dez. ($n > 652$ h), rechts: Jahr 2012 Jan. – Sep. ($n > 700$ h). (HDB = Hochdruckbefeuchtung)

Differenzdruck

In der Abb. 49 wird der Unterschied im Differenzdruck zwischen der Unterflurzuluft und den Abteilen mit Porendeckenlüftung im Vergleich zur Jahresübersicht (Abb. 49) noch deutlicher. Im Jahr 2012 waren 75% der Messwerte für den Unterdruck der Unterflurlüftung geringer als die Werte der anderen Abteile. Gleichzeitig war der Unterdruck im Referenzabteil am größten. In dem Versuch von THREM et al. (2011) hatte sich der hohe Widerstand der Portendeckenzuluft gegenüber einer Unterflurzuluft gezeigt.

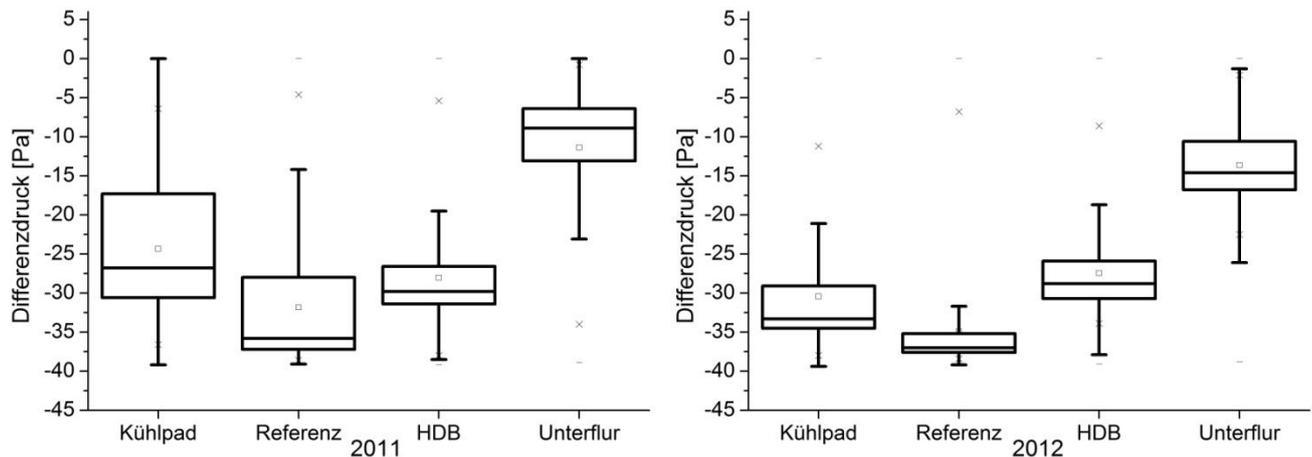


Abb. 49: Differenzdruckwerte im Abteil bei einer Außentemperatur $>22^{\circ}\text{C}$. Links: Jahr 2011 Jan. – Dez. ($n > 652$ h), rechts: Jahr 2012 Jan. – Sep. ($n > 700$ h). (HDB = Hochdruckbefeuchtung)

Temperature Humidity Index (THI)

Aus der relativen Luftfeuchte des Abteils und der Abteiltemperatur lässt sich über Näherungsgleichungen der THI berechnen (Gleichung (7)). Hier wurde nur auf die Werte zurückgegriffen, die bei einer Außentemperatur von über 22°C gemessen wurden. Im Jahr 2011 betrug die Summe dieses Messzeitraums 685 h 40 min; im Jahr 2012 betrug die Summe, an denen die Außentemperatur über 22°C lag, 736 h 1 min. Das Abteil mit dem Kühlpad hatte für einen Zeitraum von insgesamt 3 h 12 min einen zu hohen THI, dies sind 0,47% der Zeit. Im Referenzabteil wurde der Grenzwert 39 h 25 min überschritten, was wiederum 5,75% des Messzeitraums ausmacht. Bei dem Abteil mit der Hochdruckbefeuchtung ergab sich eine Grenzwertüberschreitung von 15 h 46 min (3,3%) und bei der Unterflurzuluft eine Zeit von 16 h 35 min (2,4%).

Die gleiche Rechnung wurde für das Jahr 2012 erstellt. Im Jahr 2012 wurde der Wert von 22°C Außentemperatur öfter als 2011 überschritten. Dies führte aber nicht in allen Abteilen zu einer Erhöhung der Grenzwertüberschreitung des THI. Das Kühlpadabteil hatte für insgesamt 3 h 48 min einen zu hohen Wert, dies waren 0,52% im Messzeitraum. Im Referenz-

renzabteil wurde für 85 h 30 min ein THI über 85 ermittelt. Dies entspricht 11,62% in dem besagten Zeitraum. Das Abteil mit der Hochdruckbefeuchtung hatte in der warmen Zeit 38 h 21 min die Marke von 85 überschritten, was wiederum 5,21% der gesamten Zeit waren. Den geringsten Wert in dem Jahr hatte die Unterflurzuluft. In diesem Abteil wurde der Grenzwert für 13 min überschritten, das sind rund 0,03% im Messzeitraum.

4.2.1.1.3 Heiße Tage

Anhand der Messergebnisse von ausgewählten heißen Tagen soll exemplarisch dargestellt werden, inwieweit die Kühlsysteme Spitztemperaturen abpuffern können. Ausgewählt wurde der Zeitraum um die heißesten Tage der Jahre 2011 und 2012. Dies waren der 18.08.11 bis 26.08.2011 und der 17.08.2012 bis 21.08.2012. Bei der Betrachtung dieser kleinen Zeiträume spielen der Tierbesatz und die Tiergröße eine wichtige Rolle. In Tab. 21 sind die Tierzahlen und die Lebendgewichte für das jeweilige Abteil in den betrachteten Zeiträumen aufgelistet.

Tab. 21: Übersicht über die Tierzahlen und -gewichte für den Zeitraum 18.08.-26.08.2011 und 17.08. - 21.08.2012.

Abteil	2011		2012	
	Tierzahl	Ø Gewicht [kg]	Tierzahl	Ø Gewicht [kg]
Referenz	125	32	20	116
Kühlpad	107	108	97	108
HDB	23	50	124	43
Unterflurlüftung	87	101	125	90

Abteilterperatur

Zur Veranschaulichung ist in Abb. 50 der Verlauf der Außentemperatur abgebildet. Der 23. August 2011 und der 19. August 2012 stellten die heißesten Tage des Versuchszeitraums dar. An diesen Tagen waren die schwersten Tiere in den Abteilen Kühlpad und Unterflur eingestallt. Die Kühlungssysteme dieser Abteile pufferten im Jahr 2012 diese Tageshöchsttemperaturen am besten ab. Am schlechtesten schnitt das Referenzabteil ab (Abb. 50 oben). Auch im Jahr 2012 wurden hier, bei einem Tierbesatz von nur 20 Tieren, die höchsten Abteilterperaturwerte gemessen. Die Hochdruckbefeuchtung zeigte im Vergleich zu den andern Kühlsystemen geringere Kühlwirkung.

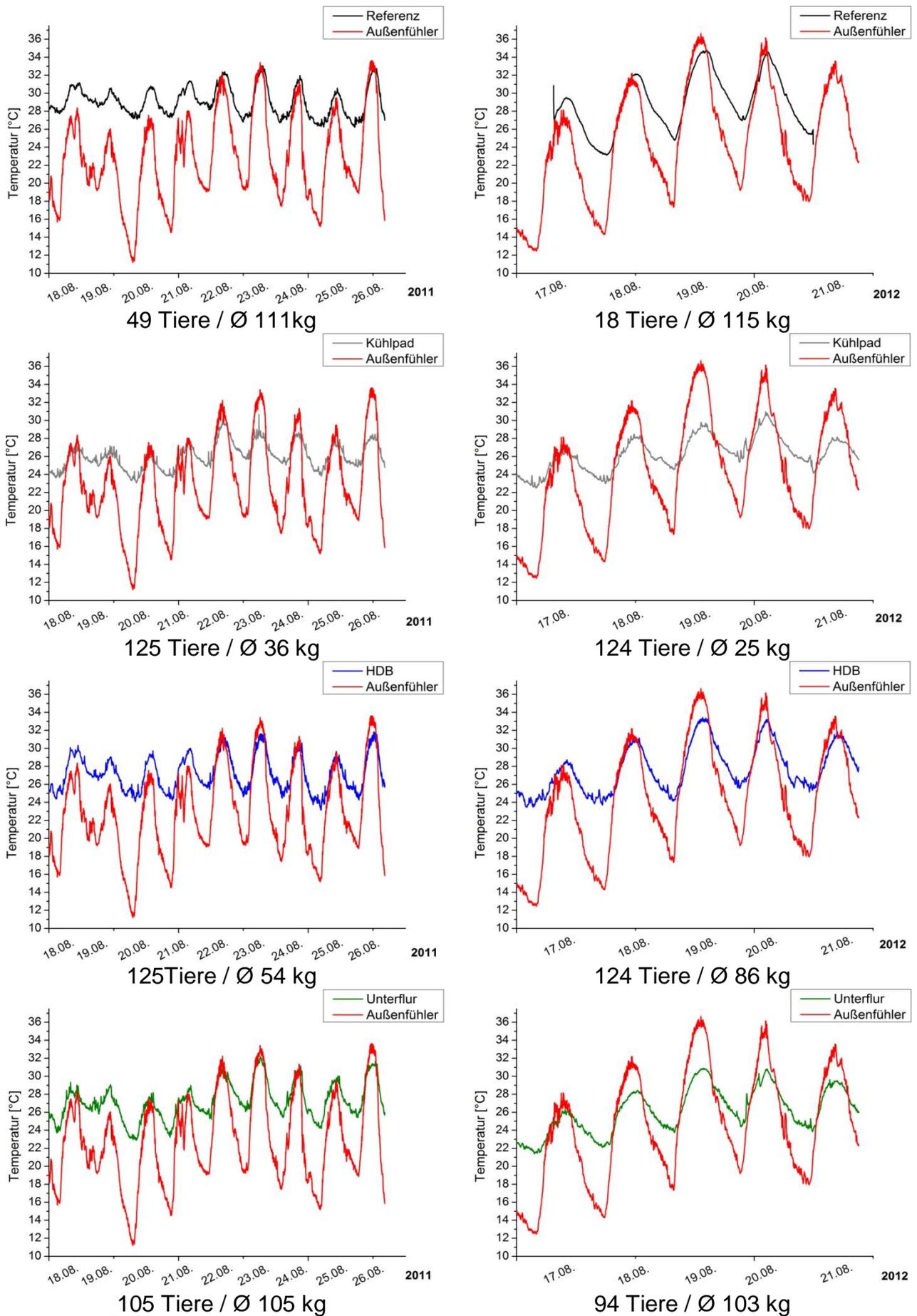


Abb. 50: Übersicht über den wärmsten Zeitraum von 2011 & 2012 mit Angabe der Tieranzahl und dem Durchschnittsgewicht. Links: Jahr 2011, rechts: Jahr 2012.

Relative Luftfeuchte

Im Hinblick auf die relative Luftfeuchte des wärmsten Zeitraums ergibt sich das gleiche Schaubild wie in den Darstellungen der Tage mit einer Durchschnittstemperatur größer 22°C

(Abb. 47). So waren die Werte der relativen Luftfeuchte beim Kühlpad und der Hochdruckbefeuchtung im Abteil am höchsten. Grund hierfür ist die zusätzliche Anreicherung der Luft mit Wasser durch die Kühlungsanlagen (vgl. Abb. 4). Die Werte der Unterflurzuluft unterschieden sich aber im Jahr 2012 nur gering von denen der Hochdruckbefeuchtung (siehe Abb. 51).

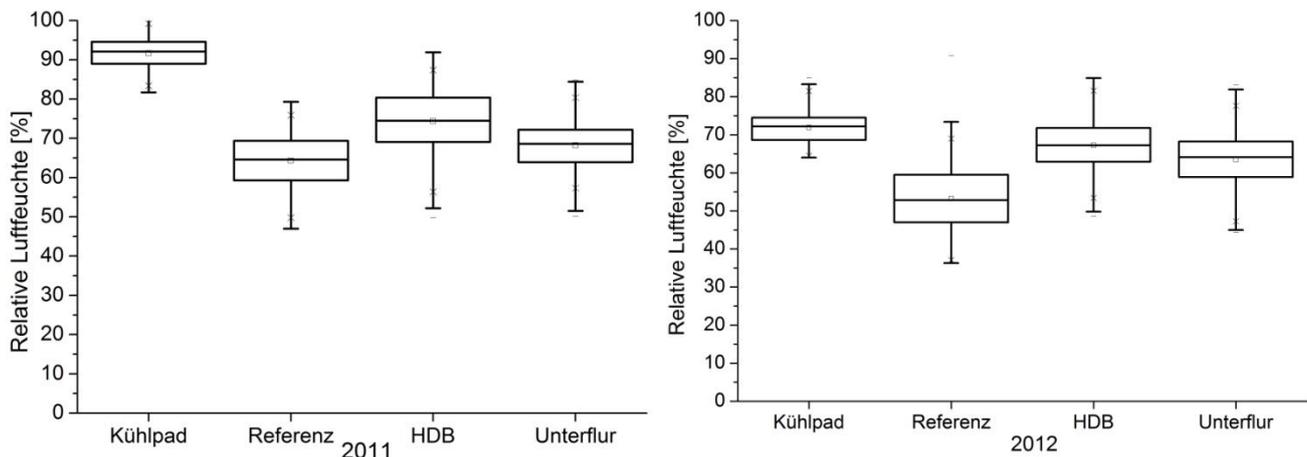


Abb. 51: Relative Luftfeuchtigkeitswerte über die zwei wärmsten Zeiträume. Links: 18.08. – 26.08.2011 n >25000; rechts: 17.08. – 21.08.2012 n >14000

Luftvolumenstrom

Beim Luftvolumenstrom zeigt sich, dass im Abteil mit Unterflurzuluft die höchsten Werte erzielt wurden (siehe Abb. 52). Die Spannweite der Werte im betrachteten Zeitraum des Jahres 2012 ist sehr groß. Im Referenzabteil und dem Abteil mit eingebautem Kühlpad ist die Werteverteilung im Jahr 2012 sehr schmal. Das Abteil mit Hochdruckbefeuchtung, in dem sich im Jahr 2012 in diesem Zeitraum die kleinsten Tiere befanden, weist den geringsten Luftdurchsatz auf.

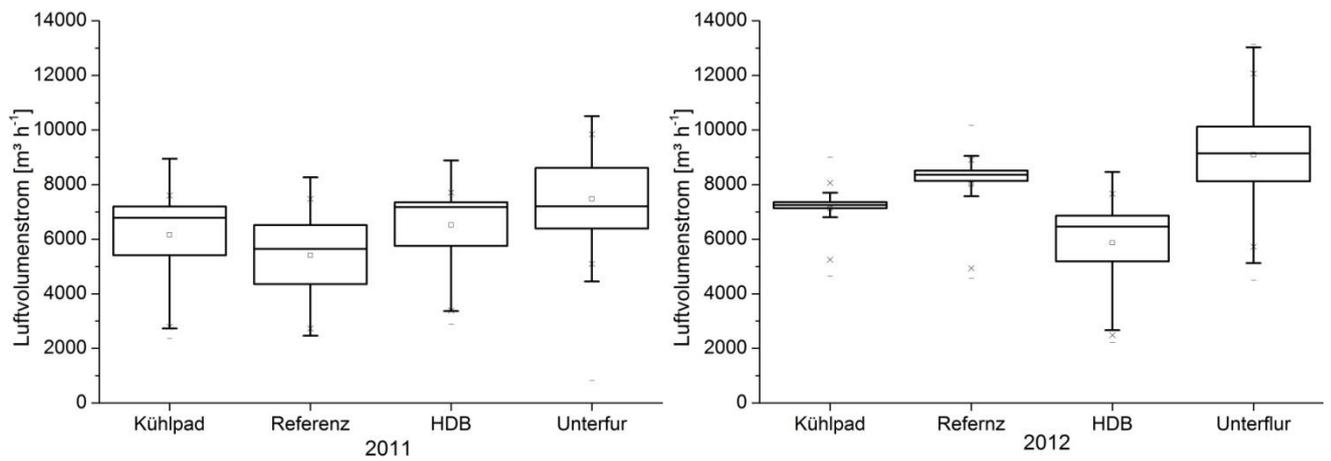


Abb. 52: Messwerte des Luftvolumenstroms über die zwei wärmsten Zeiträume. Links: 18.08. – 26.08.2011 $n > 25000$; rechts: 17.08. – 21.08.2012 $n > 14000$

Differenzdruck

Bei Betrachtung des Differenzdruckes zeigt sich das umgekehrt proportionale Verhältnis von Luftvolumenstrom und Differenzdruck. Je höher der Luftvolumenstrom (Abb. 52), desto größer ist auch die Differenz zwischen Außenluft und Abteil (Abb. 53)

Die drei Abteile mit Porendeckenzuluft wiesen sehr ähnliche Differenzdrücke auf. Im Mittel lagen diese im Bereich von -25 Pa bis -35 Pa. Lediglich das Unterflurzuluftabteil zeigt eine wesentlich geringere durchschnittliche Druckdifferenz von ca. -8 Pa bis -16 Pa in Übereinstimmung mit einem höheren Luftvolumenstrom.

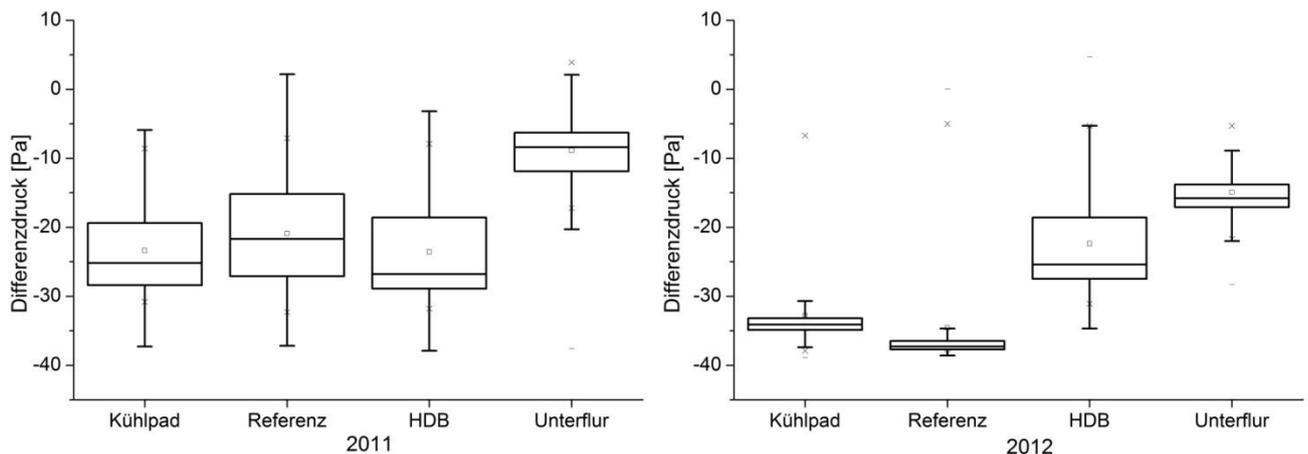


Abb. 53: Werte der Differenzdruckmessungen über die zwei wärmsten Zeiträume. Links: 18.08. – 26.08.2011 $n > 25000$; rechts: 17.08. – 21.08.2012 $n > 14000$

THI

Bei der Berechnung des THI für die heißen Tage zeigt sich, dass das Referenzabteil 2011 und 2012 am häufigsten den Grenzwert von 85 überschreitet (siehe Tab. 22). So waren es 2011 31 h 57 min und im Jahr darauf 22 h 33 min. An zweiter Position steht das Abteil mit

der Hochdruckbefeuchtung. Zwar lag im Jahr 2011 das Unterflurzuluftabteil mit 15 h 36 min etwas über dem Wert des Hochdruckbefeuchtungsabteils (15h 07min). Im darauf folgenden Jahr wurde jedoch mit 20 h 58 min (HDB) zu 8 min (Unterflur) der Unterschied zwischen den Abteilen deutlich. Die Grenzwertüberschreitung des Kühlpadabteils in beiden Jahren ist nahezu gleich. Im Jahr 2011 wurden 1h 42 min und im darauffolgenden Jahr eine Minute mehr errechnet.

Diese heißen Tage sind auch je nach Abteil für den größten Teil der Grenzwertüberschreitung verantwortlich. Hier ist jedoch noch einmal auf die unterschiedliche Stallbelegung hinzuweisen (siehe Abb. 50).

Tab. 22: Zeitliche und prozentuale Angabe zur Überschreitung des THI-Wertes von 85 im Zeitraum 18.08. – 26.08.2011 und 17.08. – 21.08.2012 (Wärmste Tage in den Jahren)

Zeitraum der Grenzwertüberschreitung (85) des THI an den „heißen Tagen“				
Abteil	2011 9 Tage (216 Stunden)		2012 5 Tage (120 Stunden)	
	Stunden	Prozent	Stunden	Prozent
Referenz	31 h 57 min	14,8%	22 h 33 min	18,8%
Kühlpad	1 h 42 min	0,8%	1 h 43 min	1,4%
HDB	15 h 7 min	7,0%	20 h 58 min	17,4%
Unterflurlüftung	15 h 36 min	7,2%	8 min	0,1%

4.2.1.1.4 Winter und Übergangsjahreszeit

Um den zusätzlichen Einfluss auf das Stallklima an kalten Tagen bei dem System der Unterflurzuluft zu zeigen, wird im Folgenden eine ausgewählte Anzahl an Tagen präsentiert. Sie sollen den Unterschied zwischen der Unterflurzuluft und einer Porendeckenlüftung verdeutlichen.

Abteilstemperatur

Werte aus dem Jahr 2012 mit einer Außentemperatur kleiner 10°C

Es zeigt sich, dass in der kalten Jahreszeit (<10°C) die Abteilstemperaturen im Unterflurzuluftabteil am meisten schwankten (siehe Abb. 54). Die hohen Werte aller Abteile wurden an Zeitpunkten gemessen, an denen junge Tiere eingestallt wurden (vgl. Sollwert Tab. 7

und Einstalltermine Abb. 12). Der Median der Abteilterperatur in allen Abteilen unterscheidet sich nur geringfügig.

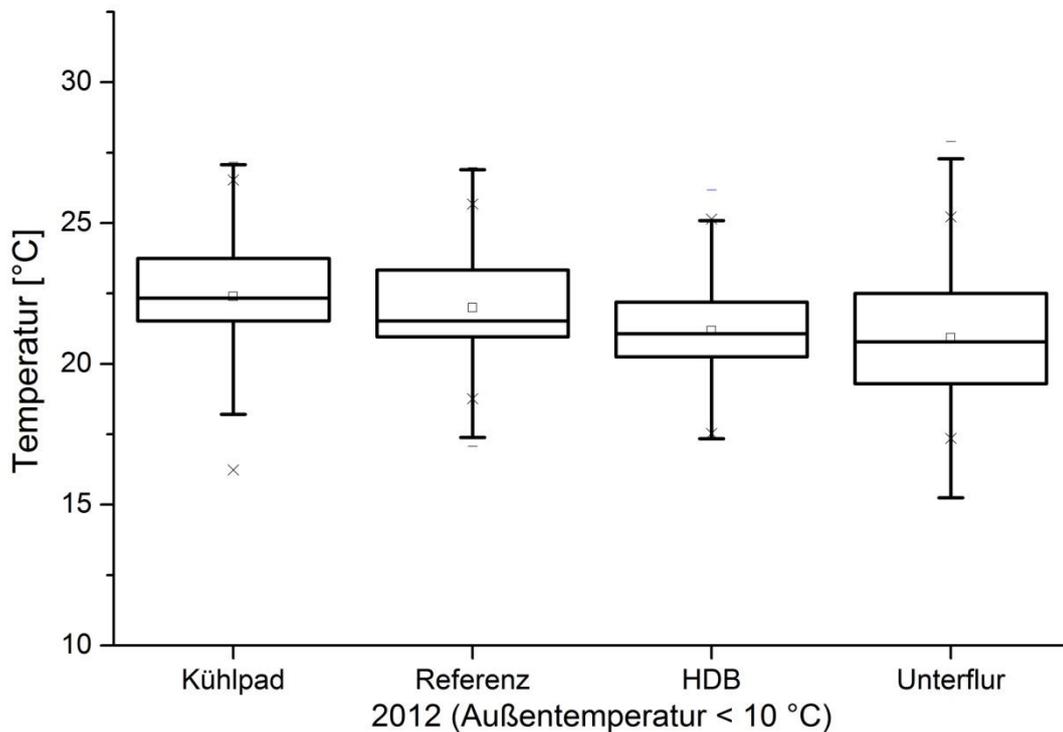


Abb. 54: Abteilterperaturwerte bei einer Außentemperatur kleiner 10 Grad Celsius im Jahr 2012. ($n > 16000$)

Betrachtet man diesen Erwärmungseffekt bei der Unterflurlüftung über den kompletten Messzeitraum mit einer Außentemperatur unter zehn Grad Celsius, so erhält man folgendes Ergebnis. Die Zuluft erwärmte sich von Punkt (1) zu (2) in Abb. 55 im Jahr 2011 durchschnittlich um 2,96 K, und im Jahr 2012 um 2,27 K. Von Punkt (2) zu (3) wurde nochmals eine durchschnittliche Erwärmung von 1,98 K (2011) und 1,94 K (2012) gemessen. Bis die Zuluft die Buchtentrennwand überquerte, gewann sie nochmals 7,89 K (Punkt (3) zu Punkt (4)). Zur Verdeutlichung ist Messpunkt (4) zusammen mit dem Abteilmesspunkt in Abb. 56 abgebildet. Bis in die Mitte des Abteils stieg die Lufttemperatur nochmals um 5,17 K auf eine Abteildurchschnittstemperatur von 20,93°C an.

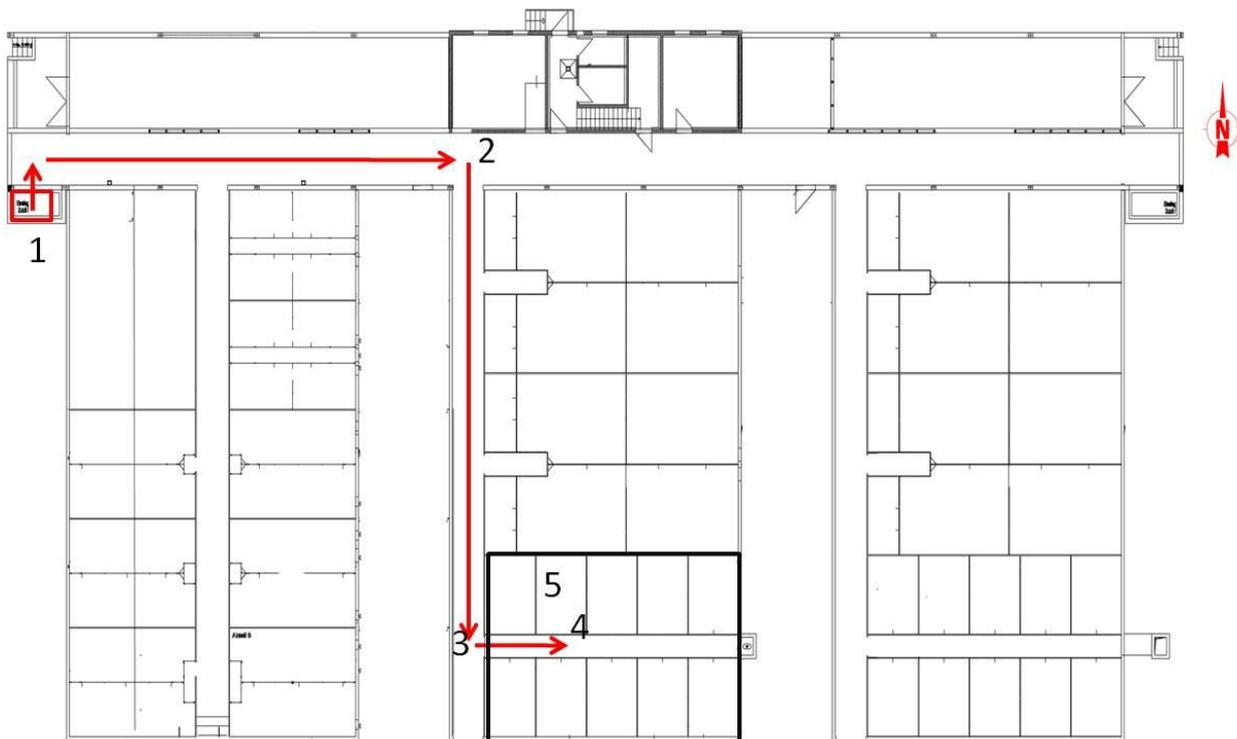


Abb. 55: Skizze der Zuluftwege der Unterflurlüftung zum Abteil und die jeweiligen Messpunkte 1 bis 5 im Winter (Grundriss des Maststalles, LSZ Boxberg).



Abb. 56: Beide Temperaturfühler im Abteil der Unterflurlüftung. Der Fühler links im Bild (Punkt (4)) zeichnet die Temperatur der Frischluft auf, wenn sie über die Buchtentrennwand zu den Tieren steigt. Der Fühler am Trog (Punkt (5)) zeichnet die Abteiltemperatur auf.

Abb. 57 zeigt die Innentemperaturen des Referenzabteils zusammen mit denen des Unterflurzuluftabteils über den Zeitraum von 10 Tagen im Februar 2012. Des Weiteren sind die Außentemperatur und die Temperatur (gestrichelt) direkt vor den beiden Abteilen dargestellt. Deutlich wird, dass sich die Zuluft auf dem Weg durch die Unterflurkanäle erwärmt. Der isolierte Dachraum zeigt ebenfalls einen geringen Erwärmungseffekt. Die höhere Ab-

teilterperatur zu Anfang des abgebildeten Zeitraums bei der Unterflurlüftung ist auf neu eingestellte Tiere zurückzuführen.

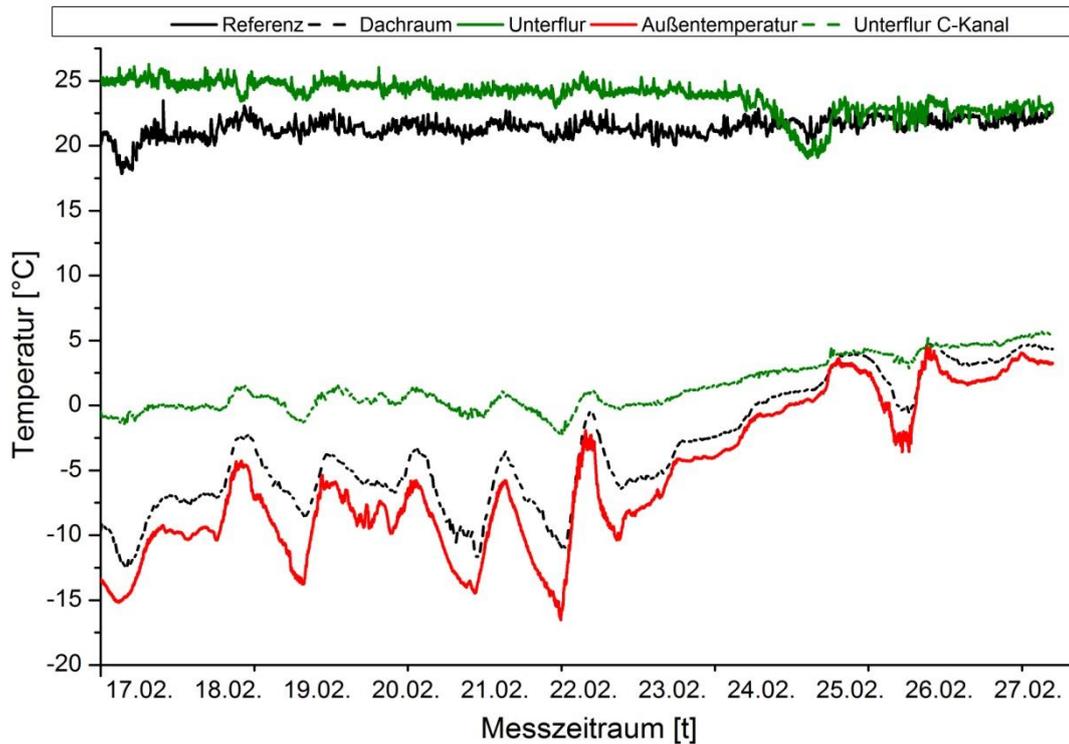


Abb. 57: Vergleich der Erwärmung der Zuluft vor dem Eintritt in das Referenz- bzw. Unterflurzuluftabteil. Temperaturmesswerte von 10 Tagen im Februar 2012.

Relative Luftfeuchte

Die Luftfeuchte ist im Winter von untergeordneter Bedeutung. Auffällig ist, dass bei der Unterflurlüftung die trockenste Luft herrschte. Die in Abb. 58 dargestellten Werte stammen aus dem Jahr 2012. Die Außentemperatur lag immer unterhalb zehn Grad Celsius. Es wurde kein Unterschied zwischen den einzelnen Abteilen mit Porendecke festgestellt. Die Hochdruckbefeuchtung schaltete sich in diesem Zeitraum bei einer relativen Luftfeuchte unter 40% ein.

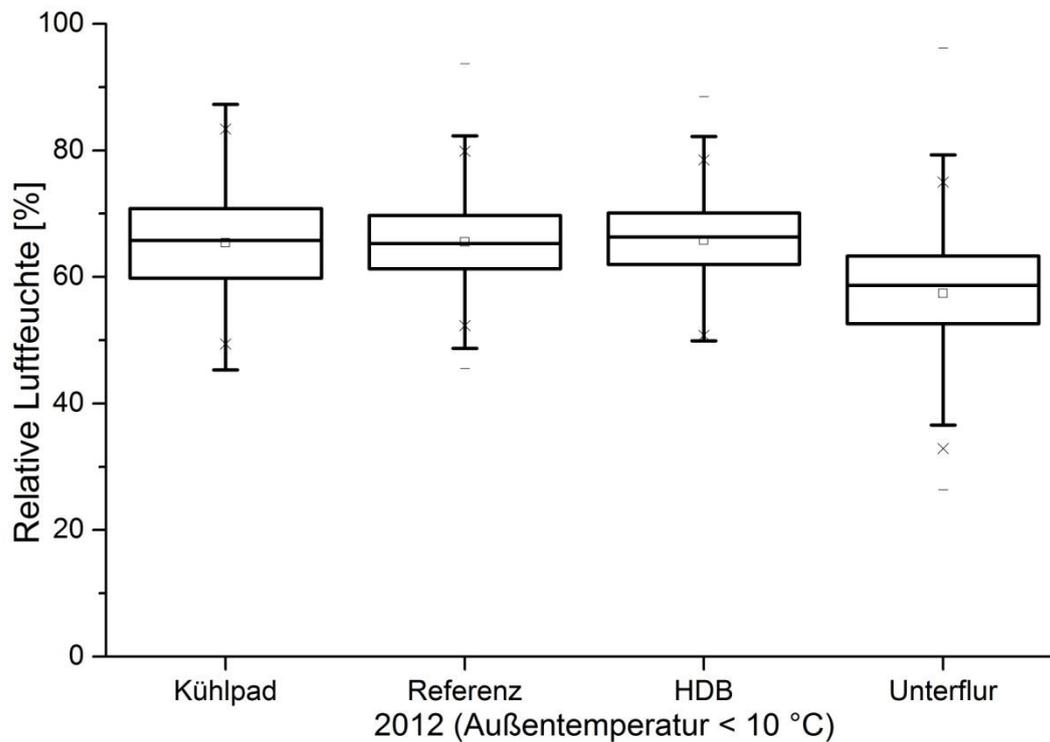


Abb. 58: Relative Luftfeuchte im Abteil bei einer Außentemperatur kleiner 10 Grad Celsius im Jahr 2012. (n >16000 → 134 h)

Luftvolumenstrom

In der Abb. 59 zeigten die Messwerte ein ähnliches Bild, wie es bereits aus den Betrachtungen der warmen Zeit hervorgeht. Hier wies erneut das Abteil der Unterflurlüftung den höchsten Volumenstrom über den Messzeitraum auf. Es lässt sich daraus erkennen, dass die Mindestluftströmung in diesem Abteil höher war als bei den anderen Abteilen, obwohl die Einstellungen der Lüftungstechnik identisch waren.

Auf Grund dass es sich bei der LSZ um eine Lehr und Versuchsanstalt handelt, werden auch immer mal wieder im laufenden Betrieb kurzfristige Demonstrationen der Lüftungstechnik vorgeführt. Diese Werte wurden nicht immer alle gelöscht, weswegen es in der Abb. 59 zum Teil sehr geringe Luftvolumenstromwerte erscheinen. Auch wurden die Aufzeichnungen schon mal eine Stunde bevor die ersten Tiere in die Abteile kamen mit den Aufzeichnungen gestartet. Dabei konnte der Lüfter noch auf der Einstellung zur Abteilaufheizung laufen. Die Werte unter den normalen Versuchsbedingungen sanken nicht unter $900 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

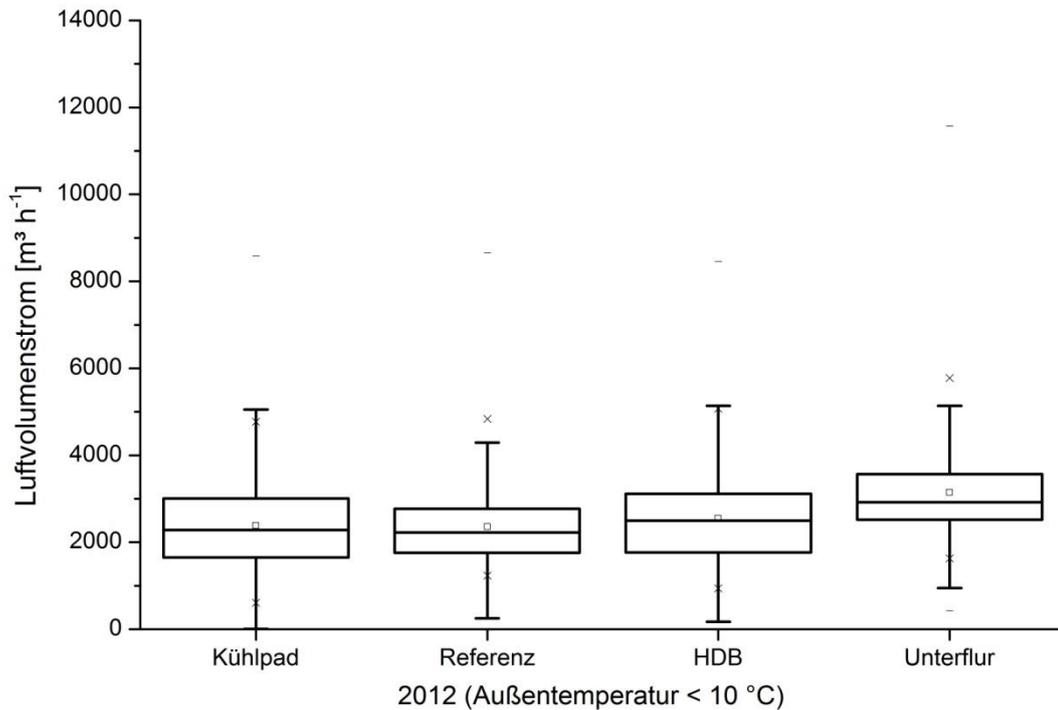


Abb. 59: Werte des Luftvolumenstroms der Abteile bei einer Außentemperatur kleiner 10 Grad Celsius im Jahr 2012. (HDB= Hochdruckbefeuchtung; $n > 16000 \rightarrow 134 \text{ h}$)

Differenzdruck

Die Erläuterungen hinsichtlich des Volumenstroms treffen auch auf den Differenzdruck (Abb. 60) zu. So wurde auch hier bei der Unterflurlüftung der geringste Unterdruck im Abteil gemessen. Allerdings war im kalten Messzeitraum die Differenz der Werte zwischen Unterflurzuluft und Porendeckenlüftung kleiner. Der Unterdruck verläuft bei Systemen mit hohem Luftwiderstand wie etwa der Porendecke parallel zum Stromverbrauch (siehe Abb. 14). Das heißt, er steigt exponentiell an.

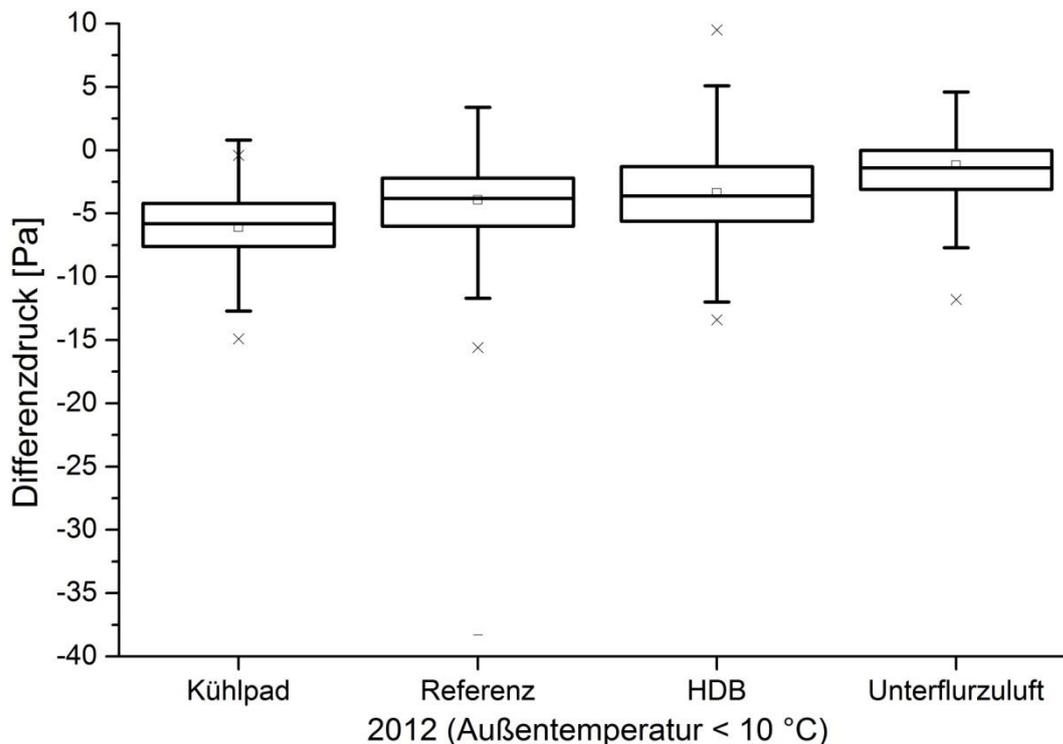


Abb. 60: Differenzdruckwerte im Abteil bei einer Außentemperatur kleiner 10 Grad Celsius im Jahr 2012. (HDB= Hochdruckbefeuchtung; $n > 16000 \rightarrow 134$ h)

4.2.1.2 Praxisbetriebe

Aufgrund technischer Probleme, die immer wieder zu Messausfällen auf den Betrieben führten (vgl. Tab. 11), und aufgrund der unterschiedlichen Wetterbedingungen an den Standorten ist eine direkte Gegenüberstellung der Messwerte der Praxisbetriebe nicht möglich. Um dennoch eine gewisse Vergleichbarkeit zu erreichen, wurden Messwerte zum Teil auf den Tierplatz bezogen.

4.2.1.2.1 Gesamter Untersuchungszeitraum

Der gesamte Untersuchungszeitraum unterscheidet sich je nach Praxisbetrieb.

- Betrieb A (Erdwärmetauscher (EWT)) Juli 2011 – Sep. 2012;
- Betrieb B (Unterflur) Juli 2011 – Aug. 2012;
- Betrieb C (Hochdruckbefeuchtung) Nov. 2011 – Aug. 2012.

Dargestellt sind alle plausiblen Messwerte in den Zeiträumen.

Außen- und Abteiltemperatur

Der Außentemperaturverlauf der verschiedenen Praxisbetriebe zeigt, dass die Temperatur an allen drei Standorten in einem ähnlichen Bereich verläuft. Des Weiteren zeigte sich im

Winter auf allen Betrieben eine sehr konstante Abteiltemperatur. Speziell bei den Betrieben A (EWT) und B (Unterflurzuluft) zeigen sich die Einflüsse der Zulufführung (Pufferwirkung des Erdreiches) über das ganze Jahr. Diese beiden Betriebe sind in der Abb. 61 dargestellt. Dort ist das große Pufferpotential des Erdwärmetauschers zu erkennen. Dagegen gibt es beim Betrieb C (HDB) keine Puffermöglichkeiten, da dieser eine klassische Oberflurzuluft besaß. Der optische Unterschied in der Grafik ab der zweiten Hälfte beruht auf der Messwertabfrageänderung. Diese wurde von 3 s auf 30 s, wie auf den anderen Praxisbetrieben, umgestellt. Zu sehen ist, dass die Abteiltemperatur im Sommerzeitraum immer über der Außenlufttemperatur liegt.

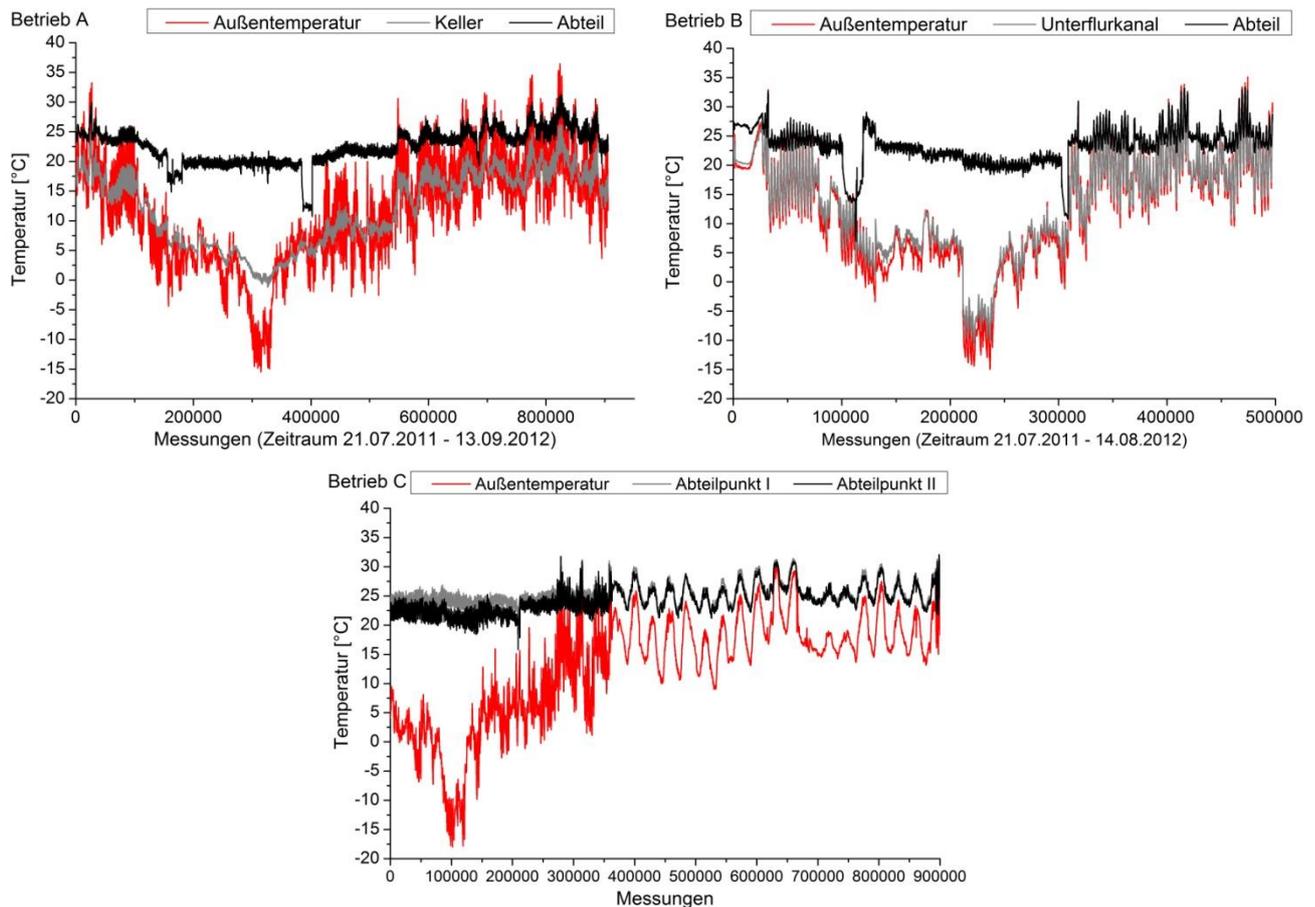


Abb. 61: Verlauf der Temperaturwerte über den Untersuchungszeitraum auf den jeweiligen Praxisbetrieben. Links oben: Betrieb A (Erdwärmetauscher), rechts oben: Betrieb B (Unterflurzuluft), unten: Betrieb C (Hochdruckbefeuchtung)

Relative Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchte lag bei den Betrieben A (EWT) und Betrieb B (Unterflurzuluft) während der Messungen fast nie über 80%. Anders ist es bei Betrieb C mit der Hochdruckbefeuchtung. Hier wird je nach Abteilmesspunkt (Abteilpunkt I = erstes Drittel Nordseite des Abteils, Abteilpunkt II Ende zweites Drittel Südseite des Abteils) dieser Wert in bis zu 25%

des gemessenen Zeitraums überschritten. Allerdings zeigt sich bei der Auswertung der Messungen, die bei einer Außentemperatur von über 22°C stattfanden (siehe Abb. 62 rechts), dass nur noch ein geringer Prozentsatz den Wert 80% überschreitet. Daraus ergibt sich, dass die Großzahl der Messwerte über 80% aus kühleren Zeiträumen (<22°C) und so aus Zeiträumen stammen, in denen die HDB ausgeschaltet war. Deswegen ist der Einfluss der HDB auf die hohe relative Luftfeuchtigkeit gering.

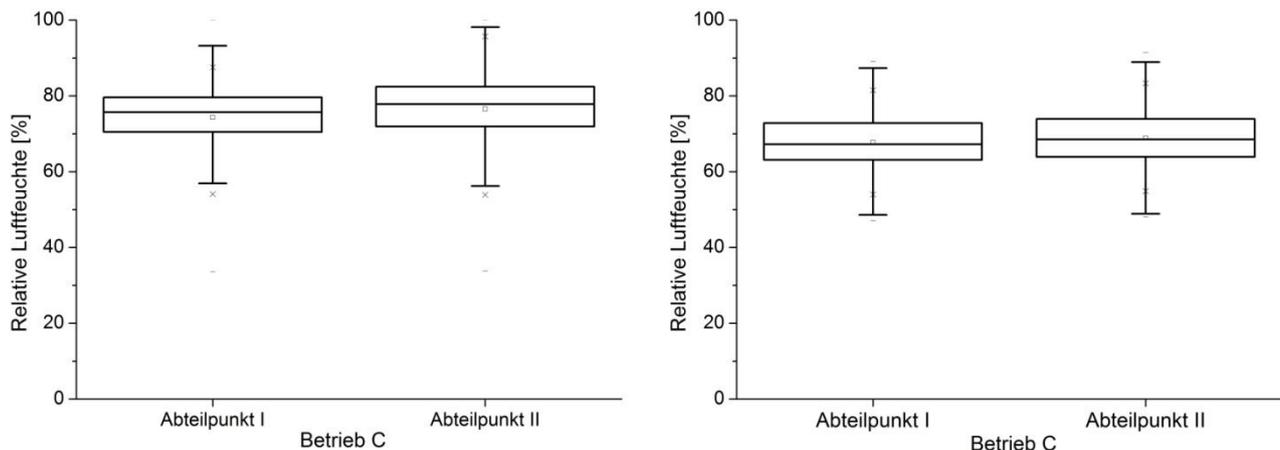


Abb. 62: Relative Luftfeuchtigkeitswerte im Abteil bei Betrieb C (Hochdruckbefeuchtung). Abteilpunkt I = erstes Drittel Nordseite des Abteil, Abteilpunkt II Ende zweites Drittel Südseite des Abteils. Links einmal der gesamte Untersuchungszeitraum 01.01.2012 - 09.08.2012 und rechts der Zeitraum bei einer Außentemperatur >22°C. (links: n > 500000; rechts: n > 180000)

Die weiteren Punkte wie Luftgeschwindigkeit im Tierbereich, Luftvolumenstrom und Differenzdruck werden im Folgenden dargestellt. Hier sind die Unterschiede bzw. Ergebnisse der einzelnen Betriebe deutlicher bei der Betrachtung der warmen bzw. kalten Tage zu erkennen.

4.2.1.2.2 Werte aus dem Messzeitraum mit einer Außentemperatur größer 22°C

Abteilstemperatur

In der Abb. 63 lässt sich sehr deutlich der Effekt des Erdwärmetauschers erkennen. Dieser kühlt im Schnitt die Außenluft um 5,39 K ab, sodass hohe Außentemperaturen keinen allzu hohen Einfluss auf die Abteilstemperatur haben. Die maximale Kühlleistung liegt bei 9 K.

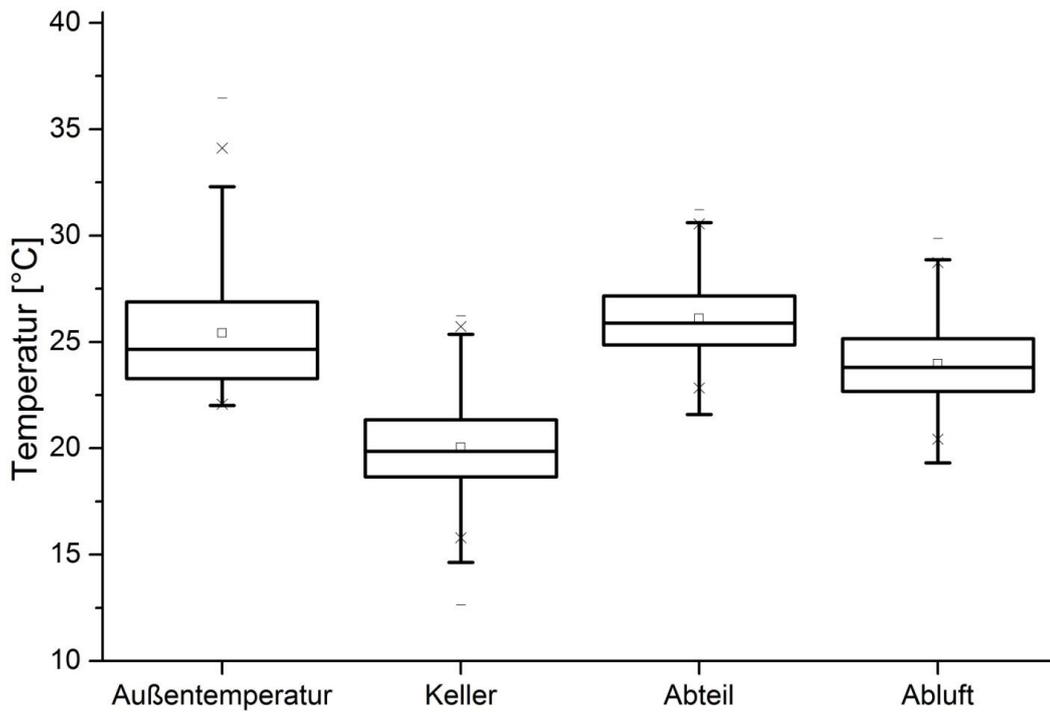


Abb. 63: Temperaturmesswerte des Betriebes A (Erdwärmetauscher) bei einer Außentemperatur $>22^{\circ}\text{C}$. ($n > 117000$)

Auch bei dem Betrieb B (Unterflurzuluft) ist eine Abkühlung der Außenluft zu sehen (Abb. 64). Diese ist allerdings nur sehr gering und es gelingt auch nicht, die Abteilterperatur unter der der Außenluft zu halten, was wiederum in der linearen Abb. 64 zu erkennen ist. Ausnahme bilden hier nur die wärmsten Zeiträume. In diesen fällt die Abteilterperatur geringfügig unter die Außentemperatur.

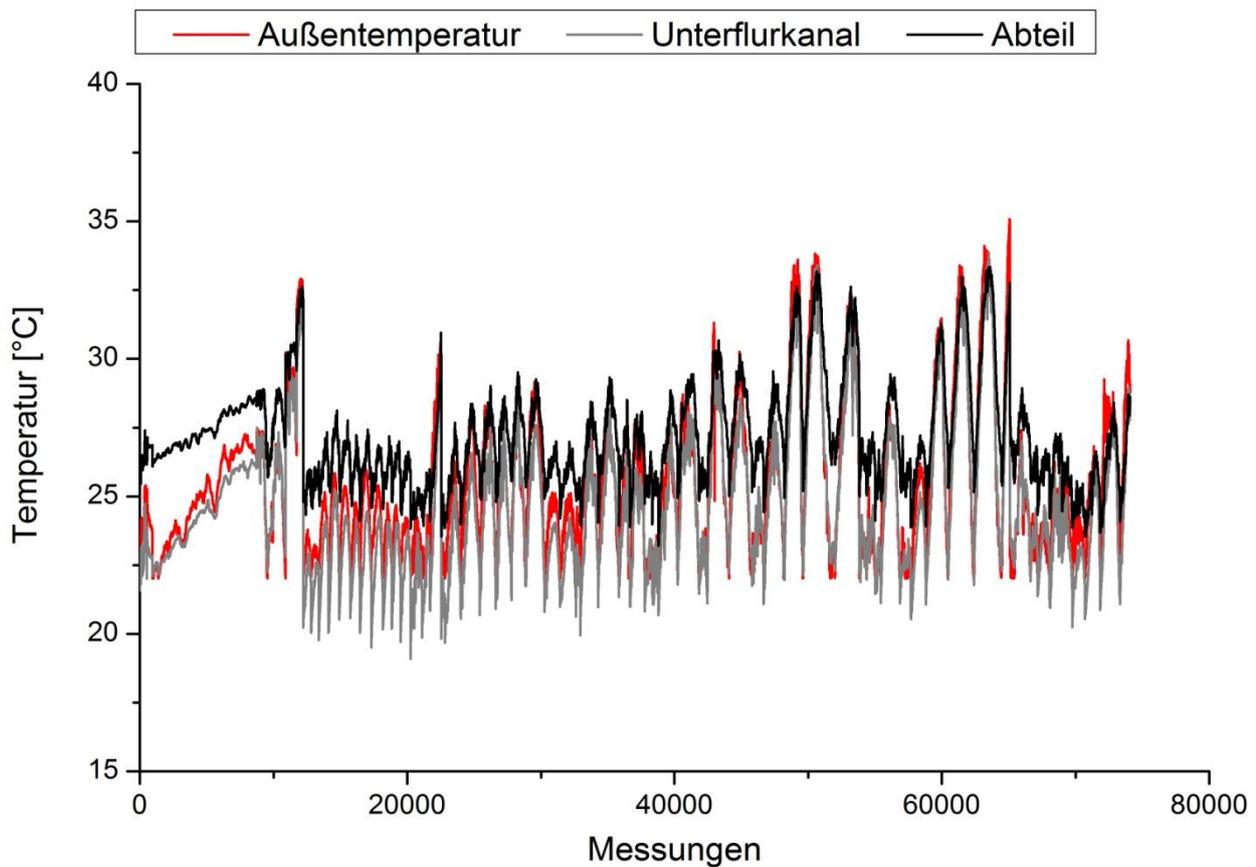


Abb. 64: Temperaturmesswerte bei einer Außentemperatur $>22^{\circ}\text{C}$ bei dem Betrieb B (Unterflurzulufführung).

Der Betrieb C (HDB) führt die Zuluft durch den ungedämmten Dachraum. Aus diesem Grund erhält man hier ein vollkommen anderes Schaubild als bei den anderen beiden Betrieben. Die Außenluft wird im Dachraum, wie in Abb. 65 zu sehen ist, nochmals erwärmt, in Einzelfällen bis zu 5,73 K. Zugleich liegt die Abteilinnentemperatur unter der des Dachraums. Dennoch wird die Außentemperatur oft überschritten. Es ist zwar ein Unterschied zwischen den zwei Messpunkten im vorderen und hinteren Teil des Abteils zu erkennen, dieser ist jedoch sehr gering.

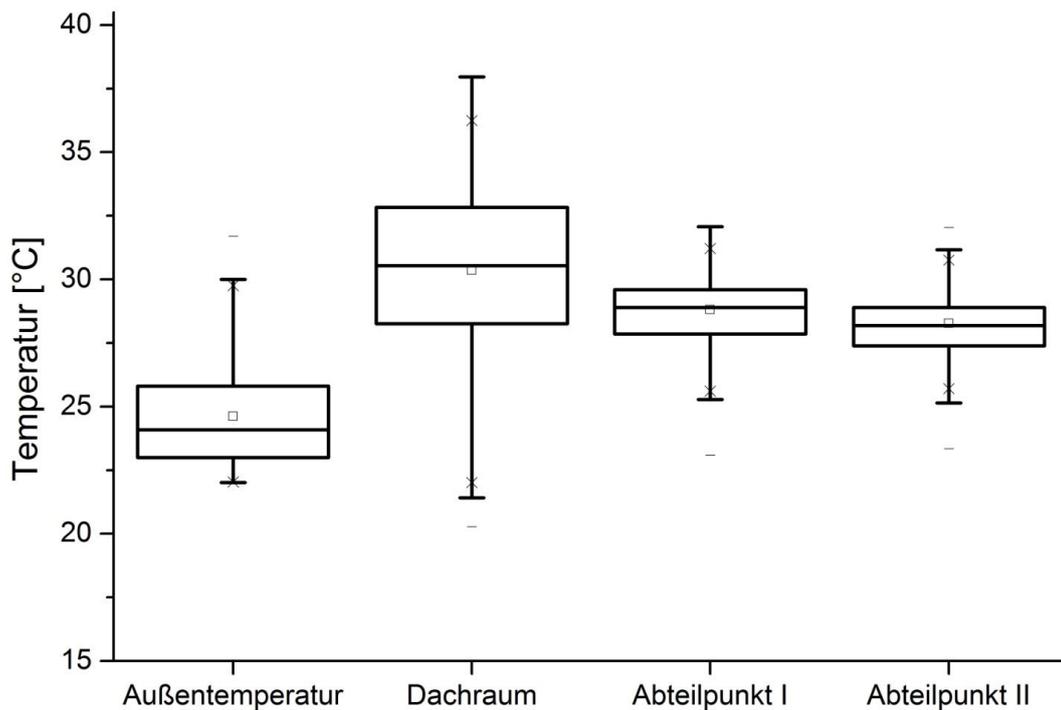


Abb. 65: Temperaturmesswerte bei einer Außentemperatur von $>22^{\circ}\text{C}$ am Betrieb C (Hochdruckbefeuchtung). ($n > 180000$)

Luftvolumenstrom

Um den Volumenstrom einzuordnen, wurde dieser auf den Tierplatz des jeweiligen Betriebes umgerechnet. Dabei zeigt sich in Abb. 66, dass der Betrieb A (EWT) nur einen mittleren Volumenstrom pro Stunde und Tierplatz von ca. 30 m^3 hat. Dies ist nur ein Drittel im Vergleich zu den anderen zwei Betrieben. Insgesamt hat der Betrieb C (HDB) mit der Strahllüftung den höchsten Luftvolumenstrom. In Boxberg liegt der Luftvolumenstrom im Schnitt bei $60 \text{ m}^3 (\text{h Tierplatz})^{-1}$.

Bei der Kalibration des Messventilators auf dem Erdwärmetauscherbetrieb (A) hat sich gezeigt, dass eine Fehllüftung möglich ist. Durch die Verbindung aller 14 Abteile mit dem Kellerraum und durch den hohen Luftwiderstand der Rippenrohre ist es bis zu einer Lüfterleistung von 40% - 50% möglich, dass bei hohen Luftstraten durch den Abluftkamin die Luft hereingezogen wird. Hierzu müssen allerdings die anderen 13 Lüfter auf 100% laufen. Der Landwirt hat dies bei hohen Temperaturen dahingehend verhindert, dass die Mindesteinstellung der Lüfter bei 60% begrenzt wurde.

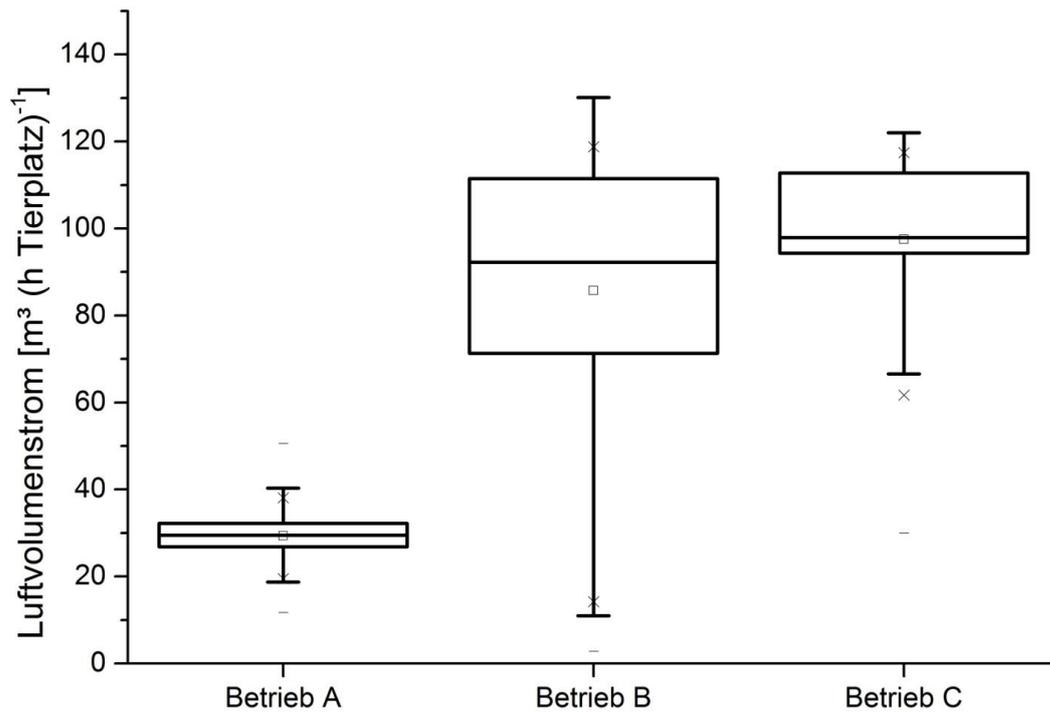


Abb. 66: Luftvolumenstromwerte je Tierplatz von den Betrieben A (Erdwärmetauscher), B (Unterflur) und C (Hochdruckbefeuchtung) bei einer Außentemperatur von $>22^{\circ}\text{C}$. ($n > 74000$)

Differenzdruck

Bei den Messungen des Differenzdrucks ergibt sich ein klares Schaubild. In der Abb. 67 sind die Messwerte des Differenzdrucks bei hoher Lüfterleistung abgebildet. Dabei zeigt die Unterflurlüftung wie auch an der LSZ Boxberg einen geringen Unterdruck. Das gleiche gilt auch für die Strahl Lüftung von Betrieb C (HDB). Nur beim Betrieb A, dem Erdwärmetauschersystem, sind die Schwankungen und die absoluten Werte des Unterdrucks am höchsten. Dabei ist der Unterschied zwischen Abteil und Kellerraum zu vernachlässigen.

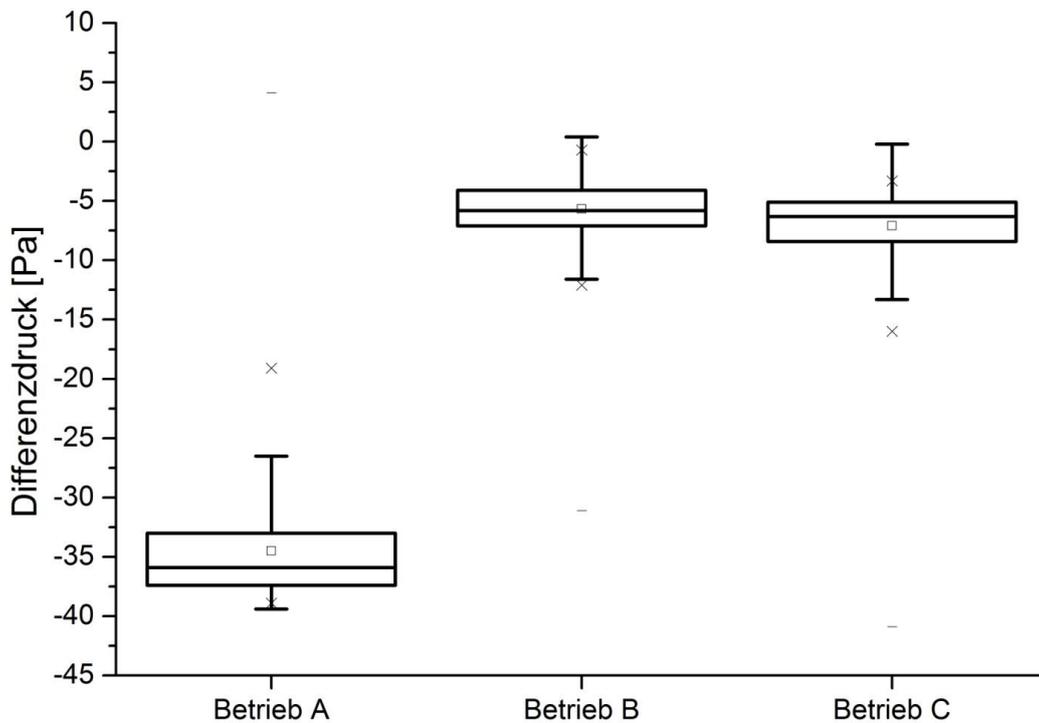


Abb. 67: Differenzdruckmessung der Betriebe A (Erdwärmetauscher), B (Unterflur) und C (Hochdruckbefeuchtung) bei einer Außentemperatur $>22^{\circ}\text{C}$. ($n > 74000$)

Temperature Humidity Index (THI)

Die Berechnung des THI ergab die geringste Grenzwertüberschreitung bei Betrieb A (EWT). Es wurden 42 min in dem Messzeitraum von 958 h 27 min ermittelt. Bei Betrieb B (Unterflur) waren es 2 h 36 min von 554 h 6 min. Betrieb C (HDB) hatte mit 11 h 48 min im Messzeitraum von 78 h 8 min die häufigsten Grenzwertüberschreitungen. Prozentual ausgedrückt betrug der Anteil der Zeit, in der der Grenzwert von 85 überschritten wurde, bei Betrieb A (EWT) 0,07%, bei Betrieb B (Unterflurzuluft) 0,47% und bei Betrieb C (HDB) 15,10%. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Gesamtzeitraum bei Betrieb C (HDB) über 22°C sehr gering ist, was sich dadurch prozentual sehr stark auswirkt. Dennoch ist die zeitliche Überschreitung des Grenzwertes von 85 viel höher als bei Betrieb A (EWT) und Betrieb B (Unterflur).

4.2.1.2.3 Winter

Bei Betrieb C (HDB) sind, bis auf den Volumenstrom, die Messungen bei unter zehn Grad Celsius nicht dargestellt. Aufgrund dass die Hochdruckbefeuchtung im Winter ausgeschaltet war wurde auf die Darstellung der Daten aus diesem Messzeitraum verzichtet, da sie nicht in Zusammenhang mit dem Kühlungssystem / Befeuchtungssystem stehen.

Temperaturverlauf von außen bis ins Abteil

In der Abb. 68 werden die Messwerte von Betrieb A (EWT) in der kalten Zeit gezeigt. Dabei ist der Einfluss des Erdwärmetauschers auf die Zuluft sichtbar. Durch dessen Einfluss werden zum einen die Schwankungen der Außentemperaturen gedämpft, zum anderen kann der Erdwärmetauscher auch den starken Abfall der Außentemperatur abfangen. Ungefähr ab der Messung 255000 (Abb. 68) ist ein Abfall der Abteilterperatur zu erkennen. In diesem Zeitraum wurden die Tiere ausgestallt. Da die Messtechnik nicht entfernt wurde, kann man hieran den Einfluss der Tiere auf die Stalltemperatur erkennen.

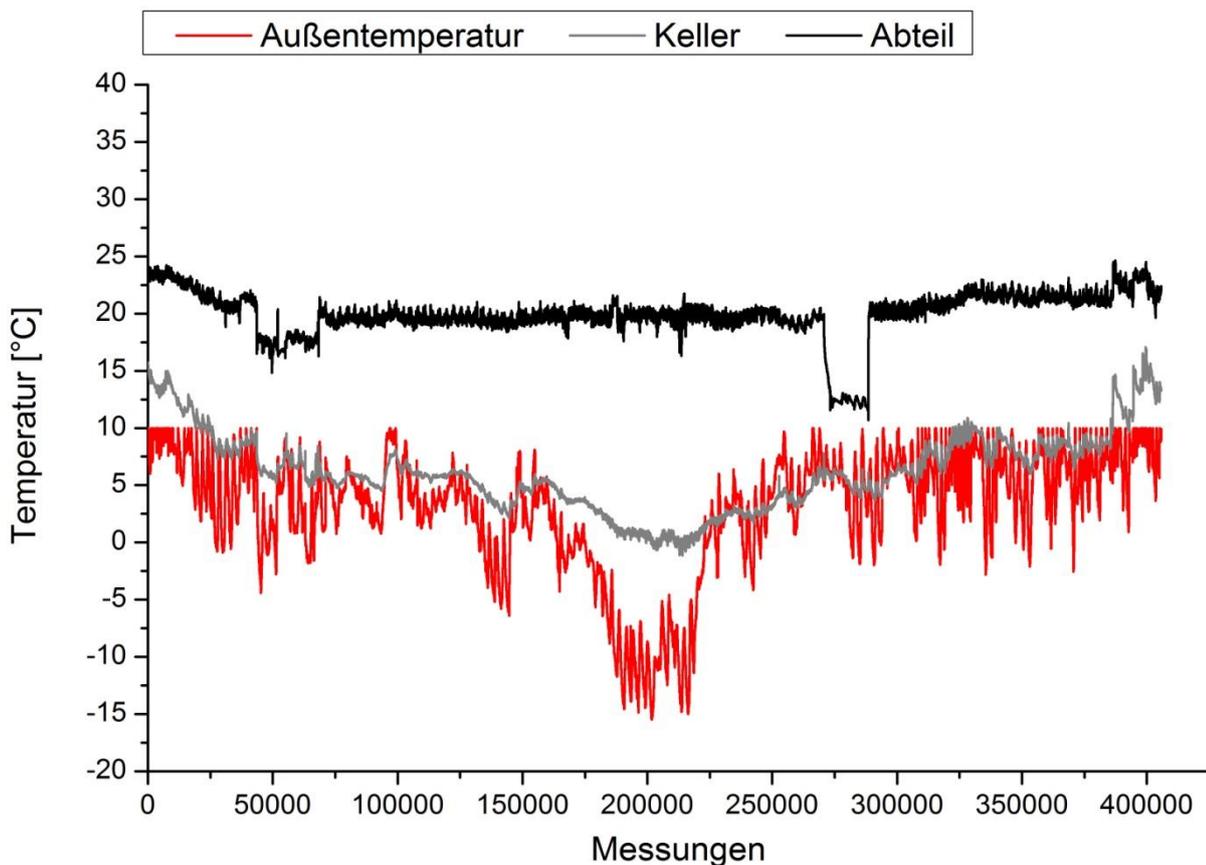


Abb. 68: Temperaturmesswerte aus dem Zeitraum 14.09.2011 bis 17.09.2012 bei einer Außenluft kleiner 10°C (3383 h) am Betrieb A (Erdwärmetauscher).

Das System der Unterflurzuluft aus Betrieb B erwärmt die Außenluft im Schnitt um 1,98 K, bevor diese in das Abteil gelangt. Hierbei betragen die größte Erwärmung ca. 4K.

Differenzdruck

Bezüglich der Messungen des Differenzdrucks werden hier nur die Ergebnisse des Betriebes A (EWT) präsentiert (Abb. 69). Hier ist im Winter der Unterdruck im Abteil des EWT zum Teil höher, als bei Betrieb B (Unterflurzuluft) im Sommer (vgl. Abb. 67). Dabei findet

die größte Veränderung des Drucks auf dem Weg von außen zum Kellerbereich statt. Der Unterschied zwischen Keller und Abteil ist gering.

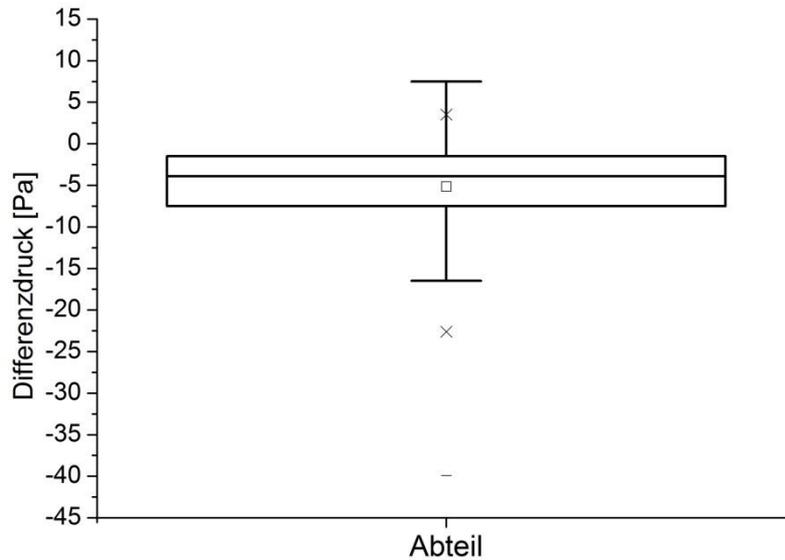


Abb. 69: Differenzdruckwerte im Kellerraum und im Abteil des Betriebs A (Erdwärmetauscher) bei einer Außentemperatur $<10^{\circ}\text{C}$. ($n > 405000$)

4.2.2 Diskussion der Stallklimaergebnisse

Gegenstand der Untersuchung war es, die Auswirkungen der Zuluft und Kühlungssysteme auf das Stallklima zu beschreiben. Dabei setzten sich die Stallklimaparameter aus Temperatur, relativer Luftfeuchte, Differenzdruck, Luftvolumenstrom, Temperature humidity index (THI) und Luftgeschwindigkeit zusammen. Die Behandlung der Schadgase erfolgt in einem gesonderten Punkt.

Hinsichtlich der Bewertung der Kühlungssysteme ist die **Temperatur** von großer Bedeutung. In der Tab. 23 werden die einzelnen Kühlungssysteme und deren Auswirkung auf die Abteiltemperatur (besser/schlechter) mit dem Referenzabteil verglichen. Diese Einschätzung basiert auf den Messergebnissen, die im Kapitel 4.2 präsentiert wurden, und deckt sich auch mit den Ergebnissen aus der Literatur (HÄUßERMANN, 2006; VAN CAENEGEM, 2007; DLG, 2005; RÖSMANN, 2012; BEYERSDORFER & GERNAND, 2012; VAN CAENEGEM et al., 2012). So hat sich gezeigt, dass alle Systeme die Zulufttemperatur absenken. Bei dem Vergleich der zwei Unterflurzuluftsysteme wird deutlich, dass die Dimensionierung des Systems einen entscheidenden Einfluss auf die Temperaturveränderung hat. So sind die Zuluftkanäle an der LSZ Boxberg wesentlich länger und größer als die des Praxisbetriebes. Gleiches wird auch von VAN CAENEGEM & DIDIER

(1998) für Erdwärmetauscher beschrieben. Hier spielen bauliche Ausführungen wie die Anzahl der Rippenrohre oder Durchmesser und Verlegetiefe eine entscheidende Rolle.

Bei den Systemen Erdwärmetauscher und Unterflurzuluft konnten die Literaturaussagen von DLG (2005); MÜLLER & VENZLAFF (2007); VAN CAENENGEM (2007); HESSEL & VAN DEN WEGHE (2011); BEYERSDORFER & GERNAND (2012); RÖSMANN (2012) dahingehend bestätigt werden, dass mittels beider Systeme sowohl die jahreszeitliche als auch die tägliche Amplitude der Zulufttemperatur gesenkt werden konnte.

Die Dimensionierung ist auch für die Systeme Kühlpad und Hochdruckbefeuchtung relevant. Diese sind allerdings neben der baulichen Dimensionierung vor allem durch die relative Feuchte der Außenluft in der Temperaturabsenkung eingeschränkt. Die Wasseraufnahme von Luft ist begrenzt, sodass Luft, die nahe dem Sättigungspunkt ist (z. B. rel. Luftfeuchte von 90%), zusätzlich nur noch gering Wasser aufnehmen kann (vgl. hx-Diagramm Abb. 4). Dadurch würde beim Kühlpad oder auch der Hochdruckbefeuchtung keine bzw. nur noch eine geringer Kühlungseffekt zum Tragen kommen.

Die **relative Luftfeuchtigkeit** in den Abteilen ist allein betrachtet nicht besonders aussagekräftig, sie wird in erster Linie von der Abteilterperatur beeinflusst. Das Zusammenspiel von Temperatur und relativer Luftfeuchte bewirkt einen positiven oder negativen Einfluss auf die Tiere. Aus diesem Grund werden in der Tab. 23 mittels des Temperature Humidity Index (THI) die Kühlungssysteme bewertet. So zeigen die Messwerte, welche in Kapitel 4.2 aufgeführt sind, dass die relativen Luftfeuchtwerte der auf Befeuchungskühlung basierenden Systeme höher sind als die der anderen Systeme. Werden diese Ergebnisse aber zusammen mit den Temperaturwerten nach dem THI von ROLLER und GOLDMAN (1969) beurteilt, ergibt sich bei allen Kühlungssystemen eine Verbesserung des Stallklimas für die Schweine. Speziell das Kühlpad kann das Stallklima zugunsten der Schweine verbessern, obwohl durch dieses System zusätzlich Feuchte über die Luft in das Abteil gebracht wird. Bei Praxisbetrieb C (HDB) war aufgrund der geringen Datenmenge und der Luftführung durch den ungedämmten Dachraum keine Aussage möglich. Die Hochdruckbefeuchtung kühlte zwar die im Dachraum aufgeheizte Luft ab, konnte aber die Luft nicht soweit kühlen, dass der Wert unter den THI-Grenzwert von 85 sank.

Des Weiteren zeigte sich, dass die Einstellung der auf Befeuchungskühlung basierenden Systeme mitunter ausschlaggebend ist, um die relative Luftfeuchte im Stall und den THI-Wert in einem optimalen Bereich zu halten. Speziell im Jahr 2011 hatte die Einstellung (keine Begrenzung der relativen Luftfeuchte im Abteil) der Kühlpadsteuerung dessen gute Kühlleistungen durch einen ungünstigen THI-Wert gemindert. Die relative Luftfeuchte im

Unterflurabteil an der LSZ Boxberg war zeitweise zu trocken und ließ sich nur geringfügig mit Wasser im Unterflurkanal erhöhen. Der Grund dafür, dass im Referenzabteil etwas feuchtere Luft herrschte, hing mit dem etwas geringeren Luftvolumenstrom zusammen. So war im Unterflurabteil speziell bei Mindestluftstraten der Luftvolumenstrom höher, was auch zu einem höheren Austrag an von den Tieren stammendem Wasserdampf führte. Dieser erhöhte Austrag spielte aber primär im Winter eine Rolle. Im Sommer erlosch dieser Effekt durch die hohen Sommerluftstraten fast vollständig.

Tab. 23: Bewertung der Kühlsysteme im Bezug zu dem gleichen Abteil ohne Kühlung. Einfluss auf das Stallklima. (o = Standard/Referenzabteil, ++ = sehr gut, -- = sehr schlecht)

Auswirkung der Kühlung auf:	LSZ Boxberg			Praxisbetriebe		
	Kühlpad	HDB	Unterflur	Betrieb A EWT	Betrieb B Unterflur	Betrieb C HDB
Abteilstemperatur	++	+	++	++	+	+
relative Luftfeuchte des Abteils	--	-	o	o	o	-
Temperature Humidity Index (THI)	++	+	+	++	+	(keine Aussage möglich)

Die Frage, ob der nötige **Luftvolumenstrom** durch die Kühlung insbesondere im Sommer gesenkt werden konnte und so eine Einsparung an Strom für die Ventilatoren möglich gewesen wäre, wurde hier nicht beantwortet. Zum einen war durch die unterschiedlichen Einstalltermine kein direkter Vergleich möglich, zum anderen waren die Effekte der Zuluftführung zum Teil sehr groß.

Die Parameter **Differenzdruck** und **Luftvolumenstrom** werden vor allem durch die Art des Lüftungssystems und weniger von der Kühlung selbst beeinflusst. Sie sind in Tab. 24 zusammengefasst. In den Untersuchungsergebnissen hat sich gezeigt, dass die Systeme Unterflurzuluft und Strahl Lüftung der Luft einen geringeren Widerstand bieten und dadurch einen geringeren Unterdruck im Abteil zur Lüftung benötigen, was sich in einem geringeren Energieverbrauch der Lüftungsventilatoren widerspiegelt. Die Rippenrohre des Erdwärmetauschers stellen einen hohen Widerstand für die Luft dar, was sich negativ auf den Luftvolumenstrom auswirkt. Dies kann zwar durch kürzere und dickere Rohre geändert werden, hat dann jedoch negative Auswirkungen auf die Kühlung bzw. Erwärmung der Zuluft (VAN CAENEGEM & DIDIER, 1998). Der Unterdruck der Porendecke im Abteil war sehr hoch, wurde aber durch die Leistungsfähigkeit der Ventilatoren ausgeglichen,

sodass die geforderten Sommerluftstraten erreicht wurden. Dies führte aber zu einem höheren Stromverbrauch der jeweiligen Abteilventilatoren (vgl. Abb. 14 und Kapitel 4.6.1).

Tab. 24: Bewertung der Zuluftsysteme bezüglich Differenzdruck und Luftvolumenstrom. (o = Standard, ++ = sehr gut, -- = sehr schlecht)

Auswirkung der Zuluftführung auf:	Zuluftführung			
	Porendeckenlüftung	Unterflur-zuluft	Erdwärmehaustauscher	Strahl- lüftung
Betriebe	LSZ Boxberg (Referenz, HDB ¹ , Kühlbad)	LSZ Boxberg und Praxisbetrieb B	Praxisbetrieb A (EWT)	Praxisbetrieb C (HDB ¹)
Differenzdruck	--	++	--	++
Luftvolumenstrom	o	++	-	++

¹ HDB= Hochdruckbefeuchtung

4.3 Schadgasmessung (CO₂, NH₃, CH₄)

4.3.1 Ergebnisse der Schadgasmessung

Die Betrachtung der Schadgasmessungen ist in zwei Bereiche untergliedert. Zunächst werden die Emissionen und Konzentrationen des gesamten Mastjahres betrachtet. Die Werte können je Tierplatz oder je Großvieheinheit (GV) angegeben werden. Aufgrund der besseren Übersichtlichkeit wird sich in der vorliegende Arbeit auf die Großvieheinheit bezogen. Zudem gab es bei der Bewertung der Emissionen je Tierplatz keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Abteilen. Der zweite Teil der Schadgasmessung fokussiert sich auf die warmen Zeiträume. Um eine Vergleichbarkeit zu den bereits präsentierten Klimaergebnissen herstellen zu können, werden auch hier die Durchschnittswerte aus den Daten der Messungen einer Außentemperatur größer 22 Grad Celsius präsentiert. Hierbei sollen insbesondere die Unterschiede zwischen den Systemen bzw. dem Einfluss der Kühlung auf die Emission gezeigt werden. Zusätzlich wurde auch der warme Zeitraum Mai bis August bewertet.

4.3.1.1 LSZ Boxberg

4.3.1.1.1 Emission

Zur besseren Einschätzung der Ergebnisse wird in den folgenden Tabellen die Anzahl der Messtage des jeweiligen Abteils aufgelistet. Der Abteilbesatz wird durch das aufsummierte Tiergewicht deutlich. Am Ende der Tabellen soll ein Ranking zeigen, welches Abteil am

besten abschneidet. Das Abteil mit der niedrigsten Emission steht auf Platz eins und das mit der höchsten bei den jeweiligen Gasen (CO_2 , NH_3 , CH_4) auf Platz vier. Zuletzt wird aus den einzelnen Platzierungen der Durchschnitt gebildet, um auch hier die Übersicht zu vereinfachen.

In Tab. 25 werden vorerst die gesamten Messwerte des jeweiligen Jahres zusammengefasst. Die Verteilung der Messtage des Jahres 2011 zeigt kaum einen Unterschied. Im Referenzabteil waren im Jahr 2012 lediglich an 168 Tagen Messungen möglich. Betrachtet man die Emissionen der Gase dieser Abteile, so wurden die größten Unterschiede bei Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4) sowohl im Jahr 2011 als auch im Jahr 2012 verzeichnet. Im Jahr 2011 schneidet das Abteil mit der Hochdruckbefeuchtung am besten ab, gefolgt von Kühlpad und Unterflurzuluft. Das Schlusslicht bildet das Referenzabteil, das den höchsten NH_3 -Wert besaß. Insgesamt ein wenig besser ist das Unterflurabteil. Dieses steht bei der CO_2 -Emission auf Platz 4. Durch die Optimierung der Kühlungssysteme im Jahr 2012 (vgl. Kapitel 3.1.1.3) sind die Ergebnisse bzw. das Ranking aus dieser Zeit für die Praxis interessanter. Hier wurden beim Referenzabteil die höchsten Emissionswerte gemessen, aber auch das Ranking der anderen Abteile ändert sich in 2012. Im Schnitt zeigte das Abteil mit dem Kühlpad die niedrigsten Emissionswerte, dicht gefolgt von der Unterflurlüftung. Auf dem dritten Platz für das Jahr 2012 liegt die Hochdruckbefeuchtung. Danach folgt das Referenzabteil, das speziell bei der Emission von Methan einen um 2 mg (h GV)^{-1} höheren Ausstoß zeigt als das Abteil mit Hochdruckbefeuchtung. Außerdem wurde hier ein um 6 mg (h GV)^{-1} höherer Ausstoß verzeichnet, als es im Abteil mit dem Kühlpad der Fall war.

Tab. 25: Ranking der Abteile anhand der Emissionswerte über den gesamten Messzeitraum 2011 und 2012. (HDB = Hochdruckbefeuchtung)

Jahr	2011											
Zeitraum	Januar bis Dezember											
Abteil	Kühlpad			Referenz			HDB			Unterflur		
Messtage [d]	203			206			200			200		
Σ Abteilgewicht [t]	1706,0			1697,8			1639,6			1673,5		
Gas	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄
[g (h GV) ⁻¹]	395	2,2	12,6	426	2,9	11,2	338	2,0	8,9	438	2,5	9,7
Ranking	2	2	4	3	4	3	1	1	1	4	3	2
Ø Ranking	2,7			3,3			1,0			3,0		
Jahr	2012											
Zeitraum	Januar bis September											
Abteil	Kühlpad			Referenz			HDB			Unterflur		
Messtage [d]	205			168			209			208		
Σ Abteilgewicht [t]	1747,9			1435,7			1666,0			1861,9		
Gas	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄
[g (h GV) ⁻¹]	320	2,6	10,4	421	3,6	14,3	412	3,4	12,2	377	3,0	8,8
Ranking	1	1	2	4	4	4	3	3	3	2	2	1
Ø Ranking	1,3			4,0			3,0			1,7		

Bei der Betrachtung der Werte aus der warmen Zeit ($T_A > 22^\circ\text{C}$) in der Tab. 26 wird deutlich, dass die meisten Emissionswerte höher lagen als die Emissionswerte der Gesamtjahresbetrachtung. Aufgrund des kürzeren Zeitfensters war auch die Anzahl der Messtage viel geringer. Lediglich bei der Gesamtbetrachtung der Sommersituation von 2011 ergaben sich Veränderungen zum Gesamtjahr. So ist das Ranking in der warmen Zeit eindeutiger. Die eigentliche Reihenfolge bleibt davon jedoch unbeeinflusst. Insgesamt wurden die höchsten Emissionswerte beim Referenzabteil gemessen.

Tab. 26: Ranking der Abteile in Bezug auf die Emissionswerte über die Messzeiträume mit einer Außentemperatur >22°C 2011 und 2012. (HDB = Hochdruckbefeuchtung)

Jahr	2011											
Zeitraum	Außentemperatur > 22°C											
Abteil	Kühlpad			Referenz			HDB			Unterflur		
Messtage [d]	71			72			71			64		
Σ Abteilgewicht [t]	504,6			548,0			594,3			504,1		
Gas	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄
[g (h GV) ⁻¹]	401	2,8	13,0	477	3,8	13,2	321	2,1	10,8	432	3,0	11,4
Ranking	2	2	3	4	4	4	1	1	1	3	3	2
Ø Ranking	2,3			4,0			1,0			2,7		
Jahr	2012											
Zeitraum	Außentemperatur > 22°C											
Abteil	Kühlpad			Referenz			HDB			Unterflur		
Messtage [d]	75			51			68			62		
Σ Abteilgewicht [t]	649,4			429,3			572,8			574,2		
Gas	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄
[g (h GV) ⁻¹]	307	2,9	10,3	440	4,3	16,5	428	3,8	13,3	379	3,5	10,1
Ranking	1	1	2	4	4	4	3	3	3	2	2	1
Ø Ranking	1,3			4,0			3,0			1,7		

Auch bei der Betrachtung der Ergebnisse des Rankings der Emissionen der gesamten Messwerte aus den Messzeiträumen 2011 und 2012 (siehe Tab. 27) lassen sich kaum Veränderungen zur Tab. 26 erkennen. Nur die durchschnittlichen Emissionswerte sind bei der „Jahresbetrachtung“ (Tab. 27) von den meisten Gasen niedriger.

Tab. 27: Ranking der Abteile in Bezug auf die Emissionswerte über die Messzeiträume in den Jahren 2011 und 2012 (HDB = Hochdruckbefeuchtung)

Jahr	2011											
Zeitraum	01.05.2011 – 31.12.2011											
Abteil	Kühlpad			Referenz			HDB			Unterflur		
Messtage [d]	203			206			200			200		
Σ Abteilgewicht [t]	1705,9			1697,8			1639,6			1673,5		
Gas	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄
[g (h GV) ⁻¹]	395	2,2	12,6	426	2,9	11,2	338	2,0	8,9	438	2,5	9,7
Ranking	2	2	4	3	4	3	1	1	1	4	3	2
Ø Ranking	2,7			3,3			1,0			3,0		
Jahr	2012											
Zeitraum	01.01.2012 – 30.09.2012											
Abteil	Kühlpad			Referenz			HDB			Unterflur		
Messtage [d]	205			168			209			208		
Σ Abteilgewicht [t]	1747,9			1435,7			1666,0			1861,9		
Gas	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄
[g (h GV) ⁻¹]	320	2,6	10,4	421	3,6	14,3	411	3,4	12,2	377	3,0	8,8
Ranking	1	1	2	4	4	4	3	3	3	2	2	1
Ø Ranking	1,3			4,0			3,0			1,7		

4.3.1.1.2 Konzentration

Neben den Schadgasemissionen sind die Schadgaskonzentrationen in den Abteilen zu beachten. In Tab. 28 sind die durchschnittlichen Schadgaskonzentrationen über die Jahre abgebildet. Bei den Messungen im Jahr 2011 als auch im Jahr 2012 fehlen jedoch die kalten Monate des Jahres. Im Jahr 2011 wurde im April mit den Messungen begonnen, während im Jahr 2012 bereits Ende September die Messungen beendet wurden. Im Vergleich zu 2011 konnten 2012 in allen Abteilen geringere Kohlenstoffdioxidkonzentrationen gemessen werden. Unterschiedlich hierzu verhielten sich die Ammoniakkonzentrationen. Hier wurde lediglich im Abteil Unterflurzuluft ein Rückgang verzeichnet. Im Referenzabteil hingegen unterschieden sich die Konzentrationen kaum, während sie in den anderen zwei Abteilen anstiegen. Im Unterflurabteil und im Abteil mit Kühlpad sank die CH₄-Konzentration vom Jahr 2011 auf das Jahr 2012. Im Referenzabteil und dem Abteil mit Hochdruckbefeuchtung wurde eine Zunahme von ca. 9 ppm gemessen. Zusammengefasst wird deutlich, dass nur bei der Unterflurzuluft alle drei Schadgaskonzentrationen von 2011 auf 2012 zurückgingen.

Tab. 28: Jahresdurchschnittskonzentrationen der einzelnen Abteile in den Jahren 2011 und 2012. (HDB = Hochdruckbefeuchtung)

Ø Kohlendioxidkonzentration (CO₂) [ppm]				
	Kühlpad	Referenz	HDB	Unterflur
2011	1749	1625	1689	1502
2012	1578	1552	1550	1207

Ø Ammoniakkonzentration (NH₃) [ppm]				
	Kühlpad	Referenz	HDB	Unterflur
2011	16,9	21,9	21,0	18,9
2012	20,3	21,9	23,3	16,4

Ø Methankonzentration (CH₄) [ppm]				
	Kühlpad	Referenz	HDB	Unterflur
2011	98,8	92,0	90,7	71,0
2012	93,1	101,1	99,5	54,7

Alle Abteilkonzentrationen wiesen über das Jahr hinweg Schwankungen auf. Hierzu ist beispielhaft in der Abb. 70 die Abteilkonzentration des Unterflurzuluftabteils und deren Verlauf über das Jahr 2012 abgebildet. Aufgelistet ist der Tagesmittelwerte des jeweiligen Gases. Speziell im Juli ist hier ein nahezu synchroner Anstieg über alle drei Schadgas-konzentrationen zu sehen.

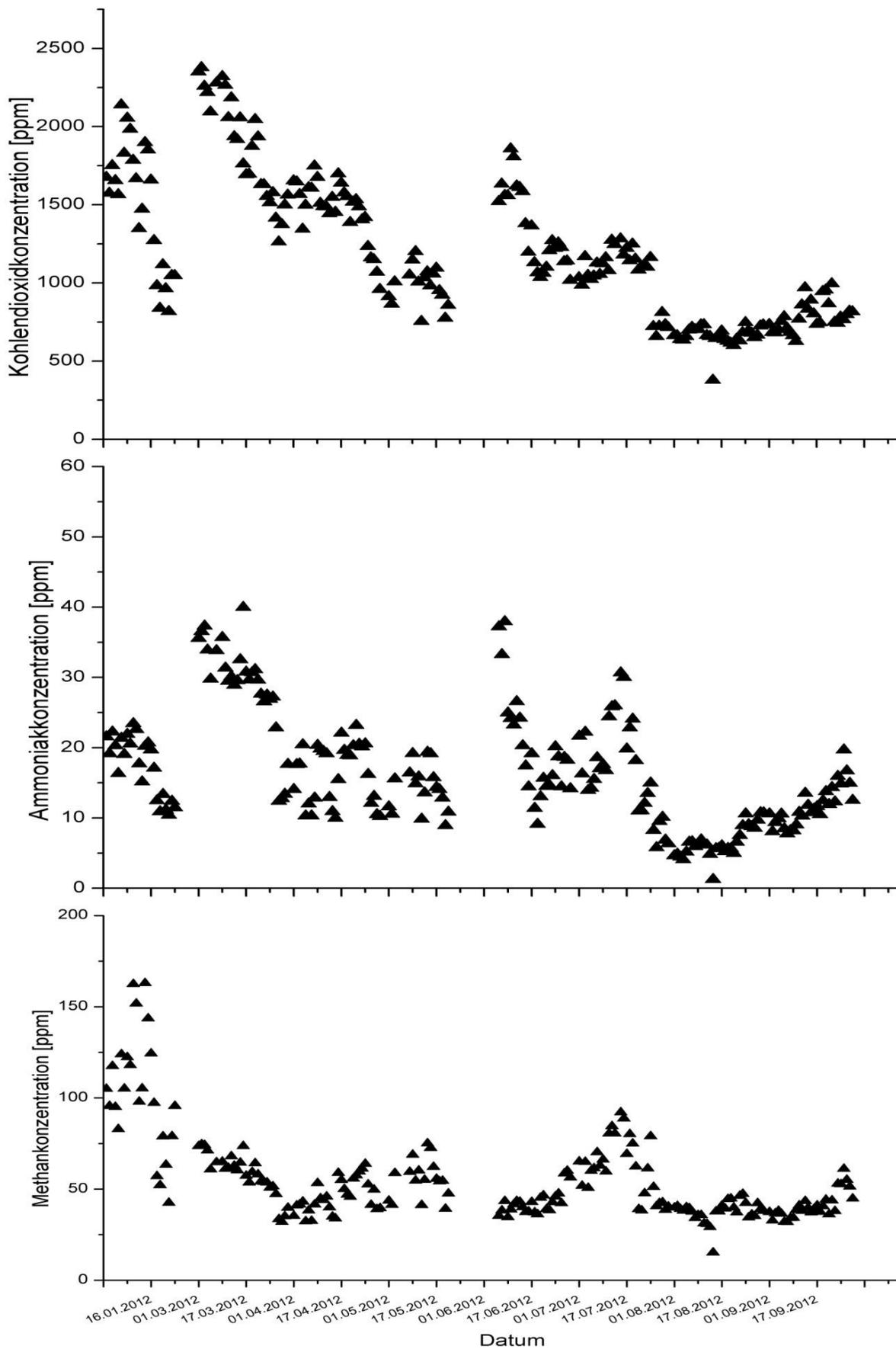


Abb. 70: Tagesdurchschnittliche Messwerte der Schadgaskonzentrationen im Abteil der Unterflurlüftung über das Jahr 2012.

4.3.1.2 Praxisbetriebe

4.3.1.2.1 Emission

Durch den häufigen Ausfall der Messtechnik bei den Praxisbetrieben ist die Anzahl der Messtage gering. Das Ranking (Tab. 29) ist nur bedingt vergleichbar. Aufgrund der betriebsbedingten Unterschiede lässt sich hier, anders als an der LSZ Boxberg, kein reiner Folgeschluss auf die Kühlungssysteme ziehen.

Die geringsten Emissionen wurden im Durchschnitt von allen drei untersuchten Schadgasen bei Betrieb A (EWT) ermittelt. Betrieb B (Unterflurzuluft) wies die geringsten NH₃-Emissionen auf. Betrieb C (HDB) hatte immer den höchsten Emissionswert bei NH₃ und CH₄.

Tab. 29: Emissionswerte und Ranking der Praxisbetriebe A (Erdwärmetauscher), B (Unterflurzuluft) und C (Hochdruckbefeuchtung) über den gesamten Messzeitraum mit einer Außentemperatur >22°C im Jahr 2011 und 2012.

Zeitraum	Gesamte Messzeitraum								
Betrieb	A (EWT)			B (Unterflur)			C HDB)		
Messtage [d]	36			32			40		
Σ Abteilmgewicht [t]	281			228			928		
Gas	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄
[g (h GV) ⁻¹]	313	2,2	2,1	464	1,9	2,8	344	3,3	3,1
Ranking	1	2	1	3	1	2	2	3	3
Ø Ranking	1,3			2,0			2,7		
Zeitraum	Außentemperatur > 22°C								
Betrieb	A (EWT)			B (Unterflur)			C HDB)		
Messtage [d]	28			27			32		
Σ Abteilmgewicht [t]	195			265			827		
Gas	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CH ₄
[g (h GV) ⁻¹]	288	2,1	2,2	448	1,8	2,8	374	3,6	3,4
Ranking	1	2	1	3	1	2	2	3	3
Ø Ranking	1,3			2,0			2,7		

4.3.1.2.2 Konzentration

Die Konzentration von Kohlendioxid lag auf allen Betrieben weit unter den geforderten Maximalwerten (siehe Tab. 30). Die geringsten Konzentrationen wurden bei Betrieb A (EWT) gemessen. Die geringsten NH₃- und CH₄-Konzentrationen wurden auf Betrieb B (Unterflur) aufgenommen. Betrieb C (HDB) fällt durch seine höhere Methankonzentration

auf. An dieser Reihenfolge ändert sich auch bei Betrachtung der Sommerlüftung nichts. Insgesamt nahmen die Schadgaskonzentrationen in der warmen Zeit in allen Abteilen ab.

Tab. 30: Durchschnittliche Schadgaskonzentration der Abteile über den gesamten Messzeitraum mit einer Außentemperatur $>22^{\circ}\text{C}$ 2011 und 2012.

Ø Kohlendioxidkonzentration (CO₂) [ppm]			
Betrieb	A	B	C
Gesamte Messwerte	1182	1279	1690
Außentemperatur $> 22^{\circ}\text{C}$	1075	1204	1310

Ø Ammoniakkonzentration (NH₃) [ppm]			
Betrieb	A	B	C
Gesamte Messwerte	10,9	7,6	27,2
Außentemperatur $> 22^{\circ}\text{C}$	9,9	6,2	22,1

Ø Methankonzentration (CH₄) [ppm]			
Betrieb	A	B	C
Gesamte Messwerte	18,8	14,7	35,1
Außentemperatur $> 22^{\circ}\text{C}$	19,4	14,6	32,0

4.3.2 Diskussion der Schadgaskonzentration und -emissionen

4.3.2.1 Schadgaskonzentration

Zur Beantwortung der Fragestellung nach dem Emissionsgeschehen und dessen Beeinflussung durch die unterschiedlichen Lüftungs- und Kühlungssysteme wurden die Konzentrationen und Emissionen der Gase Kohlendioxid, Ammoniak und Methan beurteilt. Dazu sind in der Tab. 31 zunächst Mittelwerte der Konzentrationsmessungen und vergleichbare Literaturwerte aufgelistet. In der folgenden Tabelle wird das Emissionsgeschehen ebenfalls als Mittelwert dargestellt.

Sowohl die gemessenen Konzentrationen als auch die daraus berechneten Emissionen wurden durch eine Vielzahl von Faktoren (CO₂ durch Atmung / NH₃ und CH₄ durch „Gülle und Kot“) beeinflusst (GALLMANN, 2003; HÄUßERMANN (2006); RATHMER, 2002). Dadurch ist es nicht möglich, die Einflüsse des Kühlungs- und /oder Zuluftführungssystems

tems, die auch unterschiedlich interagieren, in dieser Untersuchung auf die Konzentration und Emission eindeutig zuzuordnen.

Die Abteilkonzentrationen der einzelnen Schadgase wurden, wie auch in der Literatur zu finden ist, durch die Aktivitäten der Tiere und den Luftvolumenstrom beeinflusst. Bei der Einordnung der CO₂-Konzentrationen in der Literatur finden sich die Abteile der LSZ Boxberg und des Praxisbetriebs C (HDB) im Mittelfeld wieder, Betrieb A (EWT) und B (Unterflur) liegen in der unteren Hälfte. Dies spricht im Grunde für eine ausreichende Lüftung. Dagegen sind allerdings die Werte der NH₃-Konzentration bei der LSZ Boxberg im oberen Grenzbereich angesiedelt. Der Betrieb C (HDB) liegt weit über den in der Literatur beschriebenen Werten. Nur Betrieb A (EWT) und B (Unterflur) liegen in einem akzeptablen Rahmen. Hierzu ist zu sagen, dass bei Betrieb C (HDB) die zu gering eingestellte Lüftrate dazu geführt hat, dass die Frischluft unter den Spaltenboden gezogen wurde und damit die Schadgaskonzentrationen stark angehoben wurden. Zusätzlich war die Mindestlüftrate sehr klein eingestellt, um den Stall im Winter nicht auszukühlen. Am Ende des Versuchszeitraumes wurde eine zusätzliche Heizung eingebaut, die das Fahren der empfohlenen Lüftrate ermöglichte, was sich wiederum positiv auf die Schadgaskonzentrationen im Stall des Betriebes C (HDB) auswirkte. Besonders hoch waren die Konzentrationen für das Gas Methan. Im Vergleich zur Literatur waren hier die Werte um ein Vielfaches höher. Die genaue Ursache konnte nicht vollständig geklärt werden. Ähnliche Werte wurden nur in der Untersuchung von RATHERM (2002) gemessen. Durch die Analyse der Gülle wurde nach zu hohen organischen Substanzen durch Futterresten in der Gülle bzw. schlecht verdautem Futter gesucht. Dies konnte aber nur zu einem geringen Teil, durch Futterreste auf der Gülle unter den Futtertrögen, bestätigt werden. Es besteht eine hohe Korrelation zwischen Wasserdampf und Methan, die bei dem Multigasmonitor zu einer Fehleinschätzung der tatsächlichen Konzentration führen kann. Dies konnte aber zum größten Teil durch Vergleichsmessungen mit anderen Messgeräten, deren Messprinzip FTIR (Fourier Transform InfraRot) ist, ausgeschlossen werden.

Zusätzlich hat sich gezeigt, dass eine CO₂-gesteuerte Lüftung (VAN CAENEGEM et al., 2010) in den untersuchten Abteilen nicht sinnvoll wäre. Die Konzentrationen von CO₂ befanden sich im Normalbereich, was auf einen ausreichenden Luftaustausch schließen lässt.

Tab. 31: Vergleich und Einordnung der Ø Schadgaskonzentrationen in den Abteilen mit Werten aus der Literatur. Untersuchungszeitraum Boxberg (Mai 2011 bis Sep. 2012), Praxisbetriebe unregelmäßige Messungen im Zeitraum (Jan. 2012 bis Sep. 2012)
(HDB = Hochdruckbefeuchtung; EWT = Erdwärmetauscher)

	LSZ Boxberg				Praxisbetriebe		
	Referenz	Kühlpad	HDB	Unterflur	A (EWT)	B (Unterflur)	C (HDB)
Mittelwert der CO₂ Konzentration des gesamten Messzeitraums [ppm]	1589	1664	1620	1355	1182	1279	1690
Literatur ¹ CO₂ [ppm]	650 - 2355						
Mittelwert der NH₃ Konzentration des gesamten Messzeitraums [ppm]	21,9	18,6	22,2	17,7	10,9	7,6	27,2
Literatur ¹ NH₃ [ppm]	6 – 22						
Mittelwert der CH₄ Konzentration des gesamten Messzeitraums [ppm]	96	96	95	63	19	15	35
Literatur ¹ CH₄ [ppm]	6 - 10						

¹ Schwankungsbreite der Messmittelwerte: KECK (1997); GROOT KOERKAMP et al. (1998); NI (1998); PEDERSEN, S. et al. (1998); GALLMANN (2003); GUINGAND (2003); SCHIER & BÜSCHER (2004); HÄUßERMANN (2006)

4.3.2.2 Schadgasemissionen

Verglichen mit den Literaturwerten ist die Emission von Kohlendioxid sehr gering. Dies gilt für die Abteile der LSZ Boxberg wie auch für alle drei Praxisbetriebe. Neben dem Durchschnittswert über den gesamten Messzeitraum sind auch die Durchschnittswerte über den warmen Zeitraum ($A_T > 22^\circ\text{C}$) aufgelistet. Diese liegen ebenfalls alle unter den Werten aus der Literatur. Davon ausgehend, dass das Abteil ohne Kühlung den normalen Stand an Emissionen darstellt, wurden die anderen drei in Boxberg befindlichen Systeme bewertet. Dabei muss nochmals auf die schon erwähnten nicht zu bestimmenden Einflussfaktoren hingewiesen werden. So lässt sich in Tab. 32 auch keine quantitative Aussage treffen, um wieviel die drei gekühlten Abteile generell unter dem Referenzabteil liegen. Es ist nur möglich, die Aussage zu treffen, dass bei den Abteilen Kühlpad und Hochdruckbefeuchtung ein nennenswerter Unterschied zum Referenzabteil besteht. Für die Praxisbetriebe kann

keine Aussage getroffen werden, da die betriebsbedingten Einflussfaktoren zu groß waren, um die Werte in Beziehung zueinander zu setzen.

Die NH_3 -Emissionsmittelwerte entsprechen dem Durchschnitt aus der Literatur. Nur die Mittelwerte von Praxisbetrieb A (EWT) und B (Unterflur) sind im unteren Bereich anzusiedeln. Hier zeigt besonders das Kühlpadabteil eine geringere Emission an Ammoniak. Dies lässt unter Berücksichtigung der ermittelten Kühlleistung der LSZ Boxberg doch auf einen positiven Einfluss schließen. Es kann hier allerdings keine Aussage darüber getroffen werden, wie groß dieser wirklich ist.

Wie bereits bei den CH_4 -Konzentrationswerten, so liegen auch die Emissionsmittelwerte weit über denen der Literatur entnommenen Werten. Hier zeigt sich, dass bei erhöhten Außentemperaturen ein großer Unterschied zwischen dem Referenzabteil und der Unterflurzuluft besteht. Diese an der LSZ Boxberg geringe durchschnittliche CH_4 -Emissionsrate ist verglichen mit den Ergebnissen des Betriebes B (Unterflur) immer noch viermal so hoch.

Tab. 32: Vergleich und Einordnung der Schadgasemissionen mit Werten aus der Literatur und eine Bewertung der drei Kühlungssysteme an der LSZ Boxberg mit dem Referenzabteil. Untersuchungszeitraum Boxberg (Mai 2011 bis Sep. 2012), Praxisbetriebe unregelmäßige Messungen im Zeitraum (Jan. 2012 bis Sep. 2012)

(HDB = Hochdruckbefeuchtung; EWT = Erdwärmetauscher)

(o = Standard, ++ = sehr gut, + = gut, - = schlecht, -- = sehr schlecht)

	LSZ Boxberg				Praxisbetriebe		
	Referenz	Kühlpad	HDB	Unterflur	A (EWT)	B (Unterflur)	C (HDB)
Bewertung der CO_2 Emission zum Referenz Abteil	o	+	+	o	keine Aussage möglich		
Mittelwert des warmen Messzeitraums ($T_A > 22^\circ\text{C}$) [$\text{kg d}^{-1} \text{GV}^{-1}$]	10,2	8,6	9,0	9,8	7,5	11,1	8,2
Mittelwert des gesamten Messzeitraums [$\text{kg d}^{-1} \text{GV}^{-1}$]	11,0	8,5	9,0	9,7	6,9	10,8	9,0
Literatur ¹ CO_2 [$\text{kg d}^{-1} \text{GV}^{-1}$]	13 - 22						
Bewertung der NH_3 Emission zum Referenz Abteil	o	+	+	o	keine Aussage möglich		
Mittelwert des warmen Messzeitraums ($T_A > 22^\circ\text{C}$) [$\text{g d}^{-1} \text{GV}^{-1}$]	78	58	64	66	53	46	79
Mittelwert des gesamten Messzeitraums [$\text{g d}^{-1} \text{GV}^{-1}$]	97	68	71	78	50	43	86
Literatur ¹ NH_3 [$\text{g d}^{-1} \text{GV}^{-1}$]	23 - 150						
Bewertung der CH_4 Emission zum Referenz Abteil	o	+	+	++	keine Aussage möglich		
Mittelwert des warmen Messzeitraums ($T_A > 22^\circ\text{C}$) [$\text{g d}^{-1} \text{GV}^{-1}$]	306	276	253	222	50	67	74
Mittelwert des gesamten Messzeitraums [$\text{g d}^{-1} \text{GV}^{-1}$]	356	290	289	258	53	67	82
Literatur ¹ CH_4 [$\text{g d}^{-1} \text{GV}^{-1}$]	46 - 190						

¹ Schwankungsbreite der Messmittelwerte: AARNINK (1997); EPINATJEFF et al. (1997); KECK(1997); SNEATH et al. (1997); GROOT KOERKAMP et al. (1998); NI (1998); HAHNE et al. (1999); KAISER (1999); HEBER et al. (2000); NAVAROTTO et al. (2000); GROTZ et al. (2001); ROM & DAHL (2002); VRANKEN et al. (2002); DEMMERS et al. (2003); GALLMANN (2003); GUARINO et al. (2003); GUINGAND (2003); VAN DEN WEGHE et al. (2005); HÄUßERMANN (2006)

4.4 Produktionsauswertung

4.4.1 Ergebnisse der Produktionsauswertung von der LSZ Boxberg

Anhand der Produktionsdaten lassen sich nur geringe Unterschiede feststellen. Innerhalb des Versuchszeitraums wurden in allen Abteilen jeweils sechs Mastdurchgänge eingestellt. In drei Abteilen wurden 750 Tiere eingestellt, im Referenzabteil wurden 747 Tiere eingestellt. Eine unterschiedliche Verteilung gab es zwischen männlichen und weiblichen Tieren innerhalb der Abteile. Im Referenzabteil wurden von insgesamt 747 Tieren, 367 männliche Tiere eingestellt. Von insgesamt 750 eingestellten Tieren waren im Kühlpadabteil 273, im Abteil mit der Hochdruckbefeuchtung 302 und im Abteil mit der Unterflurzuluft 276 Tiere männlich. Die Tierverluste unterschieden sich mit 1,7% (min.) und 2,5% (max.) nicht groß voneinander. Die höchste Tageszunahme im Durchschnitt von den sechs Mastdurchgängen wurde mit 821 g d^{-1} bei den Tieren im Abteil mit der Hochdruckbefeuchtung beobachtet. Die niedrigste wurde mit 808 g d^{-1} bei den Tieren im Unterflurzuluftabteil verzeichnet. Im Kühlpadabteil lag sie bei 820 g d^{-1} und im Referenzabteil bei 816 g d^{-1} . Zwischen den einzelnen Systemen gab es Schwankungen der Tageszunahmen innerhalb der Mastdurchgänge von 10 g d^{-1} bis zu 174 g d^{-1} (vgl. Abb. 71). Dabei waren die Tageszunahmen über alle Abteile hinweg bei den männlichen Tieren um 30 g d^{-1} höher als bei den weiblichen Tieren. Die höchste Differenz lag im Durchschnitt bei den Tieren aus der Unterflurzuluft. Hier hatten die weiblichen Tiere eine Zunahme von 790 g d^{-1} und die männlichen eine Zunahme von 839 g d^{-1} . Ein direkter Zusammenhang zwischen der Außentemperatur und der Tageszunahme ist in der Abb. 71 nicht zu erkennen.

Die geringste Futtermittelnutzung wurde bei den Tieren der Unterflurzuluft festgestellt. Dort lag sie bei 1:2,90 kg. Mit 1:2,84 kg zeigten die Tiere des Hochdruckabteils die beste Futtermittelnutzung. Im Kühlpadabteil und im Referenzabteil lag sie jeweils bei 1:2,89 kg. Die Unterschiede des Muskelfleischanteils lagen im Promillebereich, sodass auf eine weitere Darstellung der Ergebnisse verzichtet werden kann. Auch die geringe Anzahl an positiven Schlachtbefunden lässt keine weiteren Aussagen oder Rückschlüsse auf die Tiergesundheit zu und wird deshalb in dieser Arbeit nicht weiter ausgeführt.

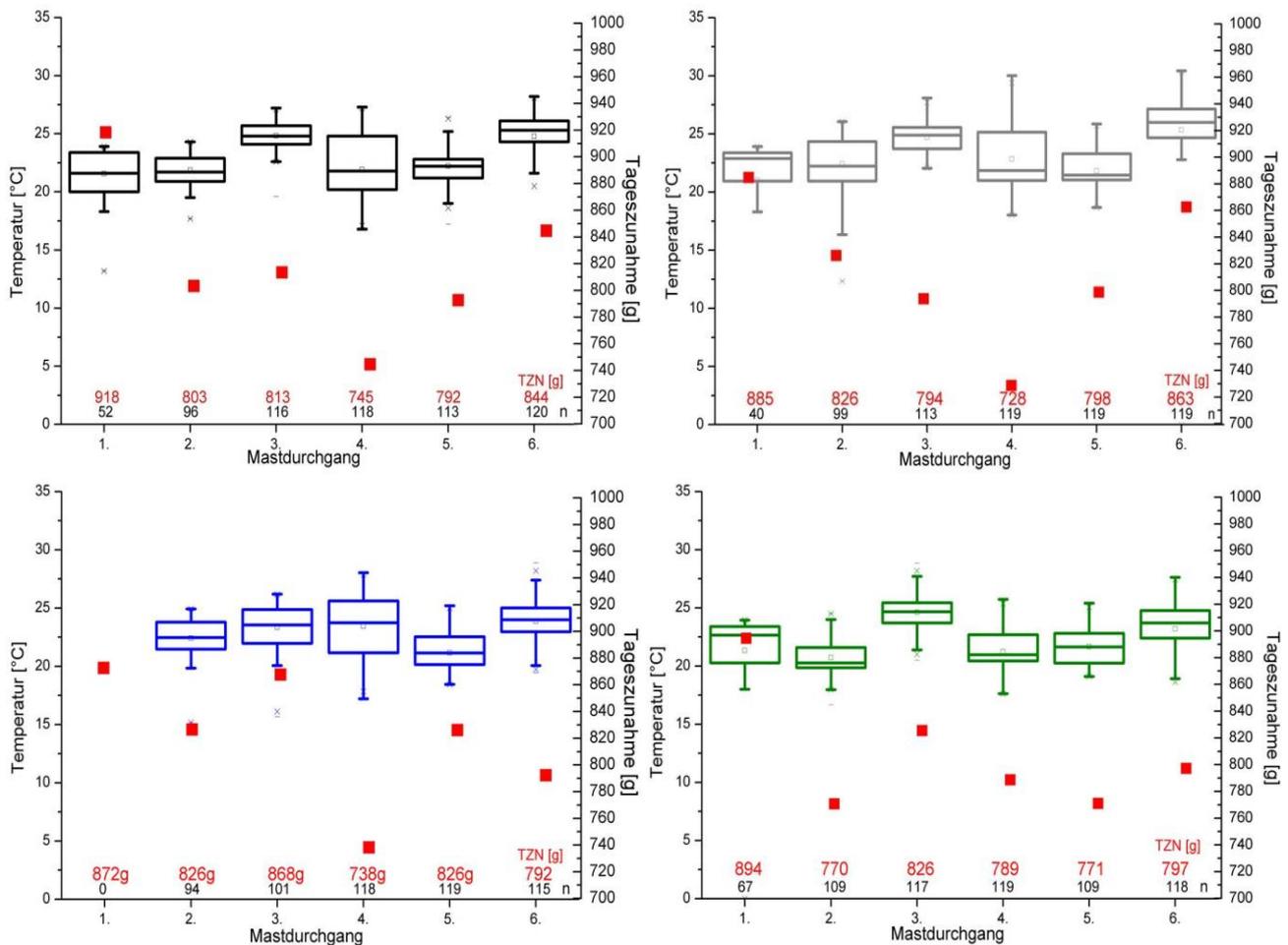


Abb. 71: Tageszunahme (TZN) im Vergleich zur Abteiltemperatur der jeweiligen Mastdurchgänge. Dabei sind die Mastdurchgänge zwischen den Abteilen zeitlich versetzt. (oben links) Kühlpad, (oben rechts) Referenz, (unten links) Hochdruckbefeuchtung erstes Boxplot fehlt wegen zu geringen Datensatz, (unten rechts) Unterflur, n >2500 h

4.4.2 Diskussion der Produktionsauswertung

Hinsichtlich der Tageszunahme und ihrer Beeinflussung werden in der Literatur folgende Aussagen getroffen. Die Tageszunahme von Schweinen wird von einer Temperaturveränderung fort aus der thermoneutralen Zone negativ beeinflusst (ABSHOFF, 1974; STOLPE & BRESKE, 1985; HOY et al., 2006; KIRCHGEßNER, 2004). Dies wird allerdings nicht bei allen Versuchen beobachtet. So wurde bei HÄUßERMANN (2006) kein direkter Einfluss der Kühlung auf die Tageszunahme festgestellt. Dagegen konnte bei ABSHOFF (1974), TIEDEMANN (1991) und VENZLAFF & MÜLLER (2008) ein Anstieg der Tageszunahme festgestellt werden. BEYERSDORFER & GERNAND (2012) weisen auf einen positiven Effekt auf die Leistungssteigerung von Sauen hin. In der vorliegenden Untersuchung konnte jedoch keine solch klare Aussage darüber getroffen werden, ob die Kühlungen einen Effekt auf die Tageszunahme ausübte.

Im Durchschnitt lagen die Werte der Tageszunahmen an der LSZ Boxberg für die Jahre 2011 und 2012 über den durchschnittlichen Tageszunahmen der Mastbetriebe des Bundeslandes Baden-Württemberg (LKV, 2012).

Neben der Temperatur spielen auch noch relative Luftfeuchte, Schadgaskonzentration, Fütterung, Tierbelegung bzw. Platzangebot und Geschlecht eine Rolle bei der Tageszunahme (STOLPE & BRESKE, 1985; BARTUSSEK et al. 2001; KIRCHGEßNER 2004; HOY et al., 2006). Allerdings konnte auch in Bezug auf diese Einflussfaktoren nicht auf Auswirkungen bezüglich der Tageszunahme geschlossen werden. Grundproblem waren die unterschiedlichen Einstalltermine. So verändert sich die thermoneutrale Zone mit dem Alter der Tiere, wodurch die einzelnen heißen Tage ganz unterschiedliche Auswirkungen auf die jeweiligen Abteile hatten. Eindeutig war hingegen der Einfluss einer Futterumstellung, die zusätzlich in allen Abteilen zu einem Rückgang der Tageszunahme führte. Die im Durchschnitt schlechte Tageszunahme der Tiere im Abteil Unterflurzuluft resultierte unter anderem auch daraus, dass die Tiere aus einem Durchgang erkrankt waren. In der Literatur werden jedoch keine Aussagen darüber getroffen, wie lange eine Heißwetterphase andauern muss, damit negative Auswirkungen beim Tier festgestellt werden können. Über den Versuchszeitraum waren die heißen Phasen immer nur sehr kurz und konnten dadurch von den Kühlungssystemen gut abgefangen werden.

KIRSCHNER et. al. (1975) berücksichtigen zusätzlich zu den oben genannten Faktoren den klimabedingten Tierverlust. Dieser Faktor ist heute bei einer normal funktionierenden Lüftung im Grunde zu vernachlässigen. Auch die Verluste an der LSZ Boxberg waren nicht klimabedingt. Dennoch könnte dieser Aspekt bei einem sehr langen Zeitraum sehr hoher Temperaturen relevant werden, und die Kühlungssysteme könnten sich dann hier positiv bemerkbar machen. KIRSCHNER et al. (1975) weisen darauf hin, dass sich Verluste von Tieren im Mastendstadium wirtschaftlich stärker niederschlagen als eine Tageszunahme, die um wenige Gramm schwankt.

4.5 Tierwohl

4.5.1 Ergebnisse der Tierbeobachtung

Die Beobachtung der Tiere fand in zwei Abschnitten statt. Der erste Teil befand sich im Zeitraum Mai 2011 bis August 2011. Der zweite Teil lag in der Zeit vom Januar 2012 bis August 2012, in dem auch die Praxisbetriebe untersucht wurden.

4.5.1.1 Neugier-, Erkundungs- und Beschäftigungsverhalten

Mit dem Beobachtungsbogen „Neugier-, Erkundungs- und Beschäftigungsverhalten“ wurden Verhaltensweisen untersucht, die sich auf das Verhalten der Tiere gegenüber ihrer Buchtenumwelt und ihren Buchtengenossen bezogen. Einen wesentlichen Teil bildeten Verhaltensstörungen wie das Schwanzbeißen und das Ohrbeißen.

Im Anschluss an diese Beobachtungen wurde festgestellt, dass es sehr schwierig ist, aufgrund des hier definierten Neugier-, Erkundungs- und Beschäftigungsverhaltens Rückschlüsse auf den Einfluss von Schadgaskonzentrationen, Temperaturen, Feuchte und Gewicht auf das Aktivverhalten der Tiere zu ziehen. Unterschiede zwischen den Abteilen konnten bei diesen Beobachtungen nicht festgestellt werden.

4.5.1.2 Liege- und Stehverhalten

Der Beobachtungsbogen „Liege- und Stehverhalten“ sollte die Tiere auf ihre Liegepositionen und sonstigen gezeigten Körperstellungen wie Stehen, Laufen, Sitzen sowie Lahmheit im jeweiligen Abteil hin untersuchen. Das Liegen und Stehen in bestimmten Teilen der Bucht sollte zum einen Auskunft über die Selbsteinteilung und Nutzung der Funktionsbereiche geben, zum anderen das thermische Empfinden der Tiere widerspiegeln.

Die Ergebnisse dieser Arbeit könnten als Hilfestellung für die Vorstrukturierung der Buchten eines Mastschweineabteils dienen, da durch das Einteilen der Buchten und die Verhaltensbeobachtungen die Vorlieben der Tiere bei der Strukturierung ihrer Haltungsumwelt abgeleitet werden konnten. Da es jedoch auch hier schwierig ist, die unterschiedlichen Kühlungs- und Lüftungssysteme als Ursache für gezeigtes Verhalten anzusehen, und weil kein wesentlicher Unterschied zwischen den Versuchsabteilen festgestellt werden konnte, wird in diesem Rahmen auf eine Vorstellung der Ergebnisse verzichtet.

4.5.1.3 Atmungsverhalten

Ergebnisse Atmungsverhalten erster Versuchszeitraum 2011 an der LSZ Boxberg

Anhand des Beobachtungsbogens „Atmungsverhalten“ sollten Tiere aufgenommen werden, die durch Krankheit oder Hitzestress keine normale Atmung zeigten. Erfasst wurden normal atmende, hechelnde, hustende und niesende Tiere. Dies verdeutlicht Abb. 72. Da die Bedeutung des Niesens nicht klar definiert werden konnte, soll dieses Merkmal im weiteren Verlauf vernachlässigt werden.

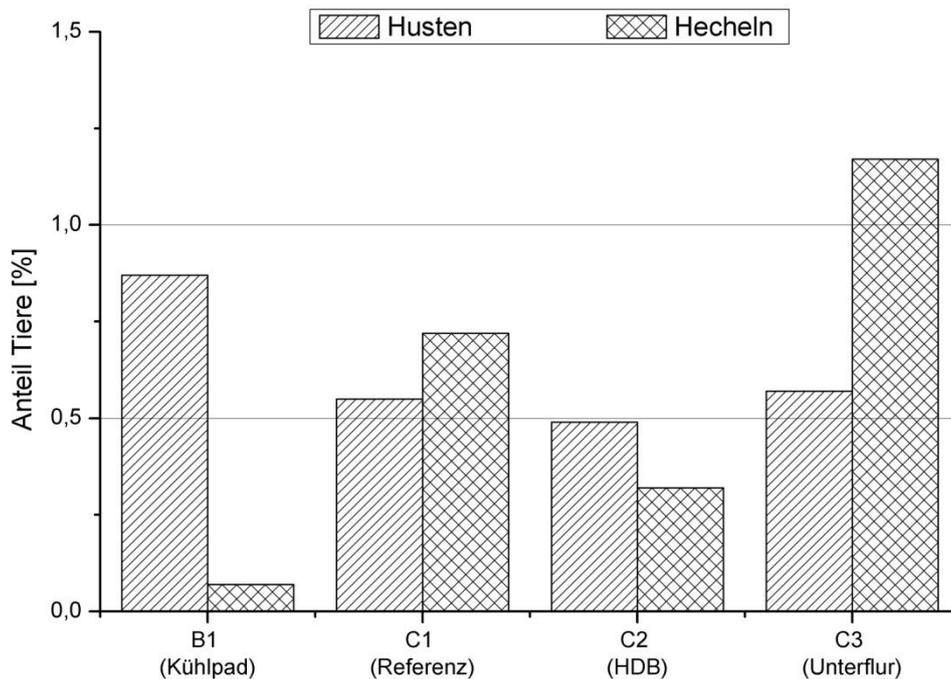


Abb. 72: Anteil hechelnder und hustender Tiere im Überblick über die Abteile B1 (Kühlpad), Abteil C1 (Referenz), Abteil C2 (Hochdruckbefeuchtung) und Abteil C3 (Unterflur). Zusammengefasst über alle 12 Beobachtungstage.

Die Differenz zu 100% innerhalb eines Abteils stellt die Anzahl der normal atmenden Tiere dar. Sehr deutlich zu sehen sind die Unterschiede beim Atmungsverhalten der Tiere zwischen den Abteilen. So lässt sich erkennen, dass in Abteil B1 (Kühlpad) die meisten hustenden und in Abteil C3 (Unterflur) die meisten hechelnden Tiere beobachtet wurden. Bei den Ereignissen Husten oder Hecheln wurden außerdem klare Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Versuchstagen erkannt. Bei dieser Verhaltensbeobachtung traten Hechel- und Hustenereignisse besonders gehäuft an einzelnen Versuchstagen innerhalb des Versuchszeitraumes auf (vgl. Abb. 73).

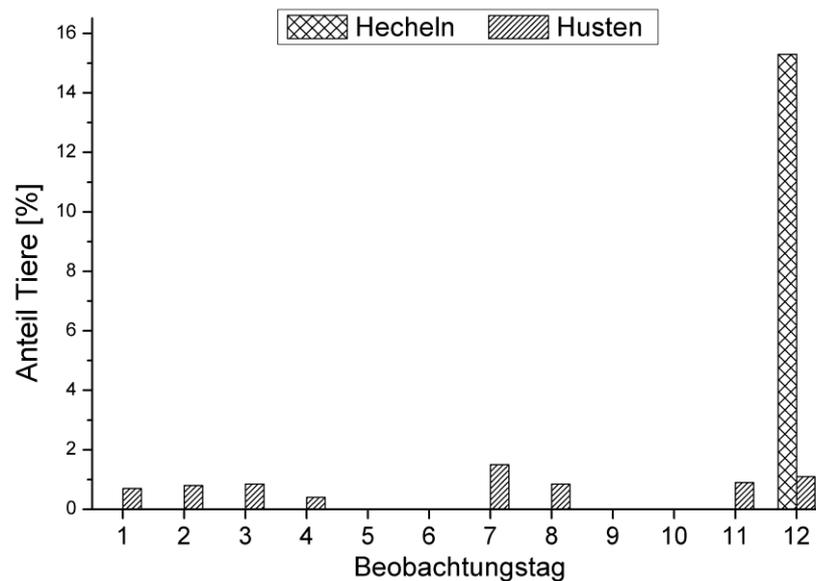


Abb. 73: Prozentuale Anzahl der hechelnden und hustenden Tiere im Untersuchungszeitraum Mai 2011 bis August 2011 im Abteil C3 (Unterflur).

Ergebnisse Atmungsverhalten zweiter Versuchszeitraum 2012

Im zweiten Versuchszeitraum (2012) wurden, zusätzlich zu den hustenden und hechelnden Tieren, Tiere aufgenommen, welche „schnelles Atmen“ oder „sonstiges“ Atmungsverhalten zeigten. Da „sonstiges“ Atmungsverhalten nicht näher definiert wurde, vielfältige Ursachen der Grund dafür sein können und es sehr schwierig ist, Rückschlüsse auf das Kühlsystem zu ziehen, wurde dieses Merkmal nicht näher untersucht und wird in der vorliegenden Untersuchung nicht weiter besprochen. Auch die normal atmenden Tiere sind in der nachfolgenden Grafik nicht aufgeführt, um eine gute Übersicht über die hechelnden, hustenden und schnell atmenden Tiere zu gewährleisten.

Sichtbar wird, dass sich die Tiere der verschiedenen Versuchsabteile deutlich in ihrem Atmungsverhalten unterscheiden (siehe Abb. 74). So wurden auf Betrieb A (EWT), gefolgt von Abteil C3 (Unterflur) in der LSZ Boxberg, im Durchschnitt die meisten hechelnden Tiere beobachtet. Praxisbetrieb B (Unterflur) hingegen zeigt eine geringere Anzahl schnell atmende Tiere und Betrieb C (HDB) ein paar hustende Tiere. Zu beachten ist jedoch, dass es sich in jedem Abteil um sehr geringe Prozentsätze handelt. Prozentsätze weit über 1% wurden nur bei den hechelnden Tieren aus Betrieb A (EWT) beobachtet.

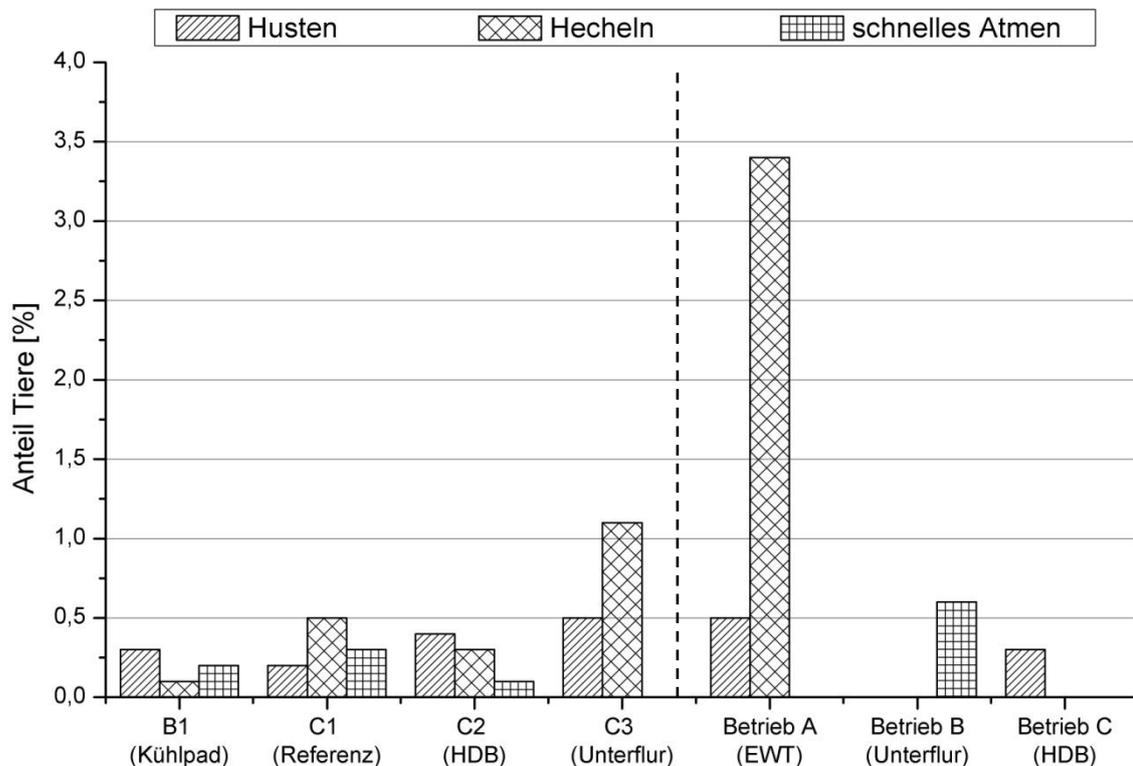


Abb. 74: Atmungsverhalten der Tiere des zweiten Versuchszeitraumes (2012). Versuchsabteile in Boxberg (linker Teil) und Praxisbetriebe (rechter Teil) (HDB= Hochdruckbefeuchtung)

4.5.1.4 Buchtenverschmutzung

Ergebnisse Buchtenverschmutzung erster Versuchszeitraum 2011

Für den Versuch an der LSZ Boxberg wurde ein Beobachtungsbogen „Buchtenverschmutzung“ erarbeitet, welcher die Verschmutzung der Buchten über eine Mastperiode dokumentieren sollte. Aufgrund eines Umbaus des Mastschweinestalls an der LSZ Boxberg waren die Buchten nicht in Kot-, Fress-/ Aktivitäts- und Liegebereich vorstrukturiert. Die Untersuchung sollte zeigen, inwiefern sich die Tiere ihre Bucht selber einteilen, und ob Temperaturen, Feuchten, Gewichte oder Schadgaskonzentrationen die Einteilung der Buchten verändern.

Die nachfolgende Abbildung zeigt eine durchschnittlich beobachtete Buchtenverschmutzung von vier Buchten des Versuchsabteils B1 (Kühlpad) im ersten Versuchszeitraum (2011).

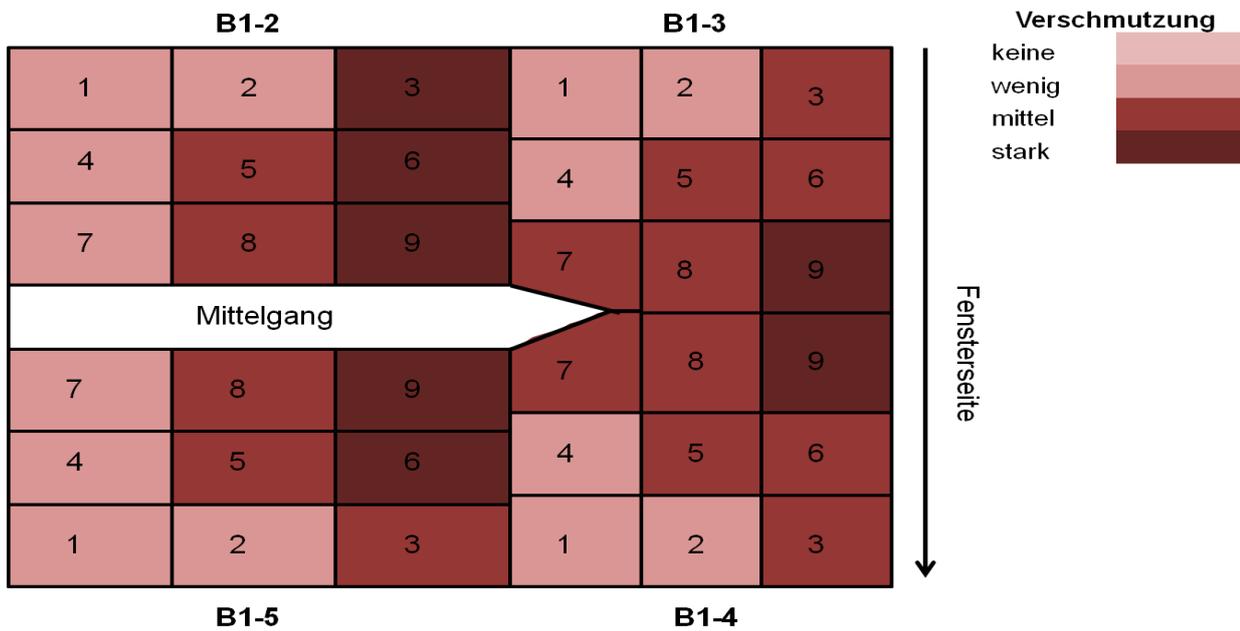


Abb. 75: Ø Buchtverschmutzung (Bereiche 1 bis 9) über alle Beobachtungen in Abteil B1 (Kühlpad). Zusammenfassung des ersten Versuchszeitraums (12 Beobachtungstage 2011).

Anhand dieser Abbildung ist zu erkennen, dass sich die Schweine in Abteil B1 (Kühlpad) ihre Bucht in verschiedene Bereiche einteilten. Besonders verschmutzt waren die Rechtecke, die an der Fensterseite lagen, sowie die Rechtecke, welche an eine andere Bucht grenzten (siehe Abb. 75).

Zum Vergleich soll Abb. 76 dienen. Diese Abbildung zeigt das Abteil C1 (Referenzabteil), ebenfalls die durchschnittliche Beobachtung im ersten Versuchszeitraum (2011).

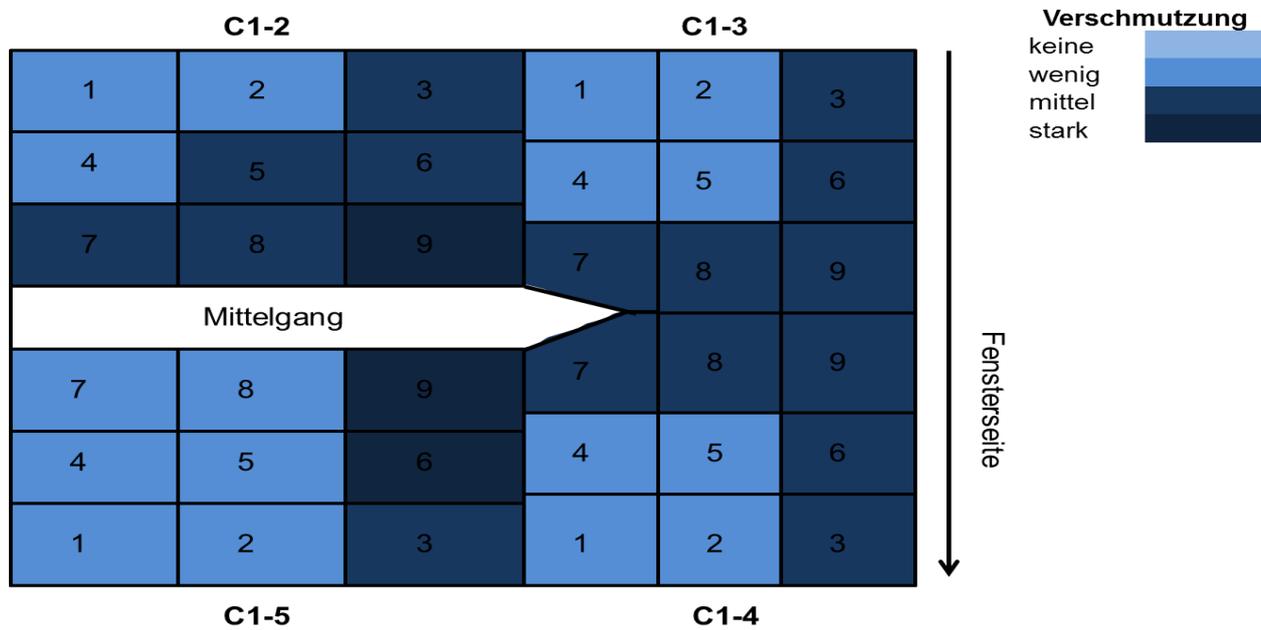


Abb. 76: Ø Buchtverschmutzung (Bereiche 1 bis 9) über alle Beobachtungen in Abteil C1 (Referenz). Zusammenfassung des ersten Versuchszeitraumes (12 Beobachtungstage 2011).

Aus den Abbildungen des ersten Versuchszeitraumes wird ersichtlich, dass die Tiere bei der Abteile selbständig eine Buchtstrukturierung vornahmen. In Abteil B1 (Kühlpad) als auch in Abteil C1 (Referenz) waren die Rechtecke, welche an eine andere Bucht oder an die Außenwand grenzten, mittel bis stark verschmutzt. Die übrigen Rechtecke wurden nur wenig von den Tieren verschmutzt. Die Buchten der anderen zwei Versuchsabteile zeigten ein ähnliches Bild (siehe Anhang Abb. A 2 und Abb. A 3).

Das Verschmutzungsprofil der zu beobachteten Buchten wurde zu jedem Beobachtungstermin aufgenommen. So konnte zusätzlich ein Verschmutzungsprofil im Verlauf der Untersuchung und entlang eines Mastabschnitts erstellt werden.

Das in Abb. 77 dargestellte Verschmutzungsprofil des Abteils B1 (Kühlpad) des ersten Versuchszeitraumes ist beispielhaft für alle Versuchsabteile. Sichtbar wurde, dass die Buchtverschmutzung bei allen vier Beobachtungsbuchten von Beobachtung zu Beobachtung zunahm. Die erste Beobachtung wurde in Abteil B1 (Kühlpad) kurz nach dem Einstellen durchgeführt, die letzte Beobachtung unmittelbar vor dem Ausstallen der Tiere. Sichtbar wird, dass die Buchten in bestimmten Mastabschnitten (hier zwischen dem vierten und achten Beobachtungstag) die größte Verschmutzung aufwiesen. Dieses Ergebnis wurde in allen Versuchsabteilen bestätigt.

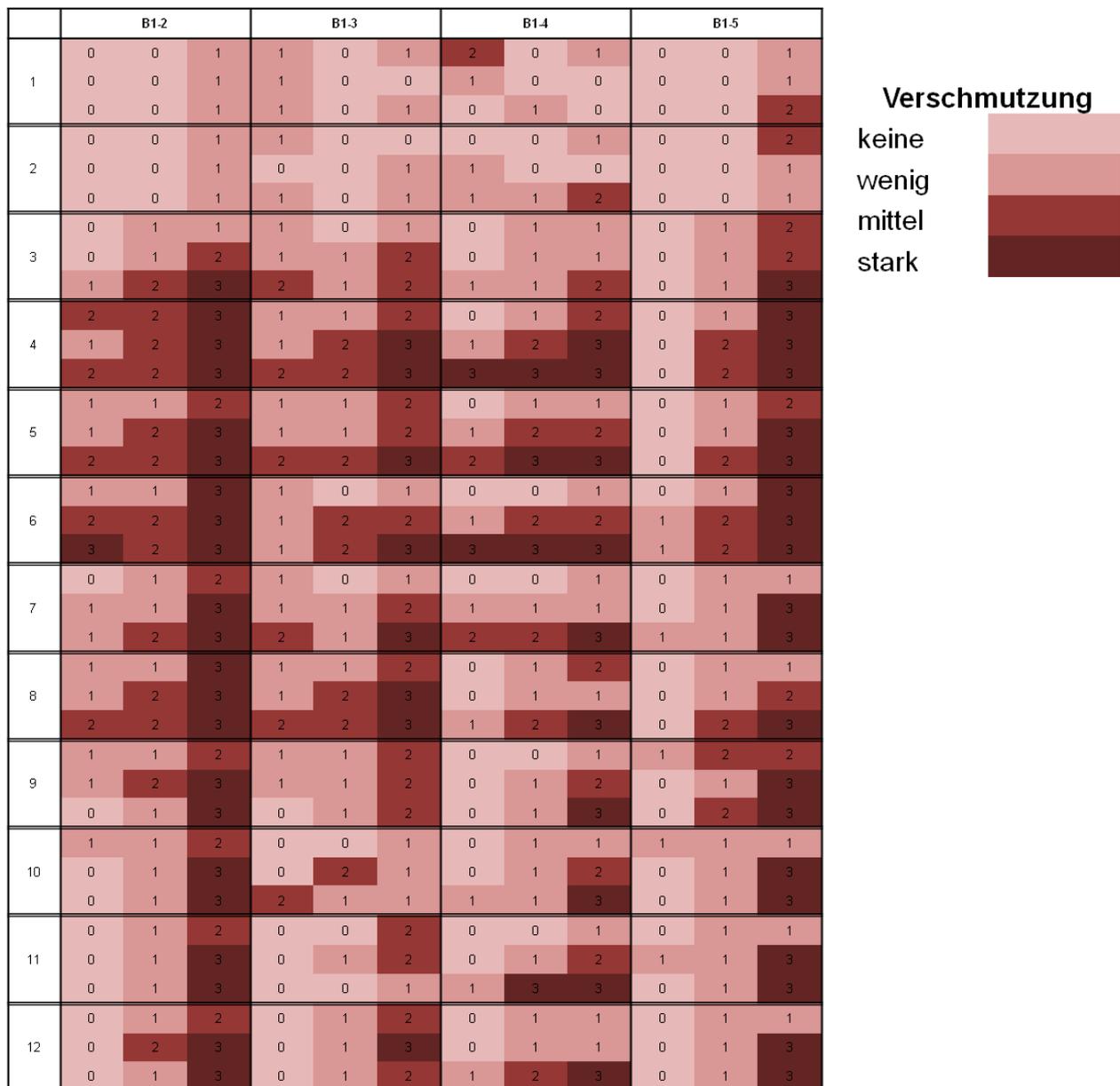


Abb. 77: Buchtenverschmutzung innerhalb des Abteils B1 (Kühlpad) im ersten Versuchszeitraum (12 Beobachtungstage 2011).

Ergebnisse Buchtenverschmutzung zweiter Versuchszeitraum 2012

Im zweiten Versuchszeitraum (2012) wurden die Beobachtungen der Buchtenverschmutzung nicht nur an der LSZ Boxberg wiederholt, sondern auch an den drei beteiligten Praxisbetrieben durchgeführt. Nachfolgende Abbildung zeigt erneut das Abteil B1 (Kühlpad) der LSZ Boxberg im zweiten Versuchszeitraum (2012). Neben den vier Buchten (B1-2 bis B1-5) wurden auch die Buchten B1-1 und B1-6 beobachtet, sodass das gesamte Abteil beobachtet wurde.

In Abb. 78 wird ersichtlich, dass die Tiere der Buchten B1-4 bis B1-6 ihre Bucht im Durchschnitt anders einteilen als die Tiere der Buchten B1-1 bis B1-3. Erkennbar ist, dass die

Buchten B1-1 bis B1-3 die gleiche Buchtenstrukturierung aufweisen wie im ersten Versuchszeitraum, während die anderen drei Buchten von dieser Einteilung abweichen.

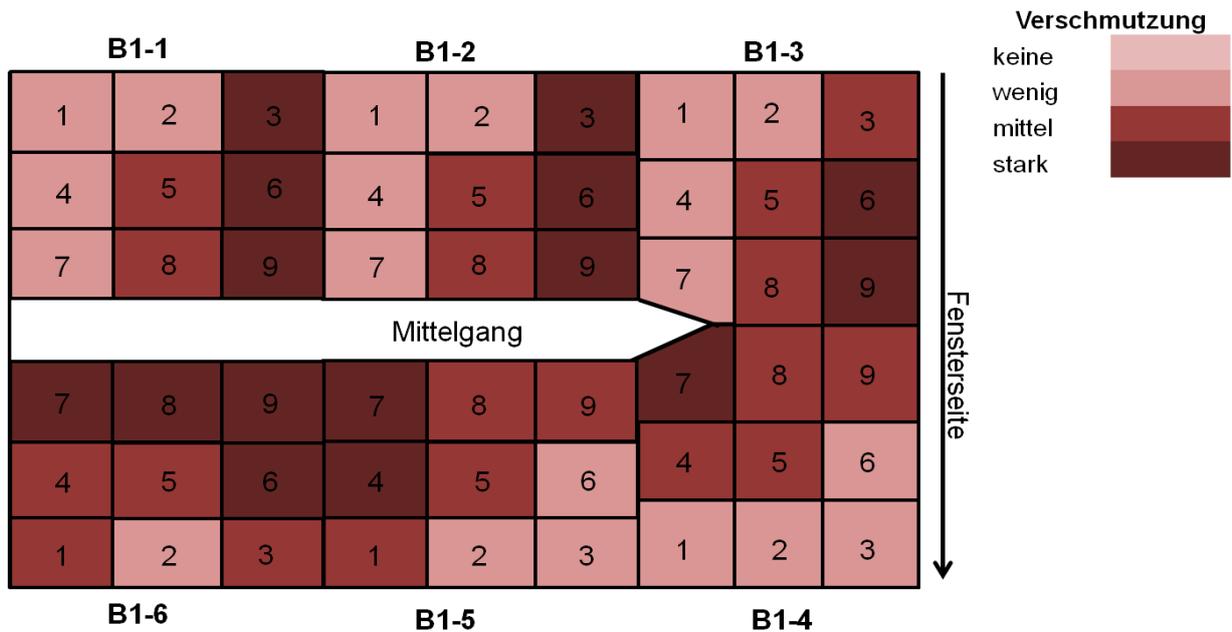


Abb. 78: Ø Buchtenverschmutzung (Bereiche 1 bis 9) über alle Beobachtungen in Abteil B1 (Kühlpad). Zusammenfassung des zweiten Versuchszeitraums (20 Beobachtungstage 2012).

Zum Vergleich dient erneut die Zusammenfassung der Beobachtungen aus Abteil C1 (Referenz) in folgender Abbildung.

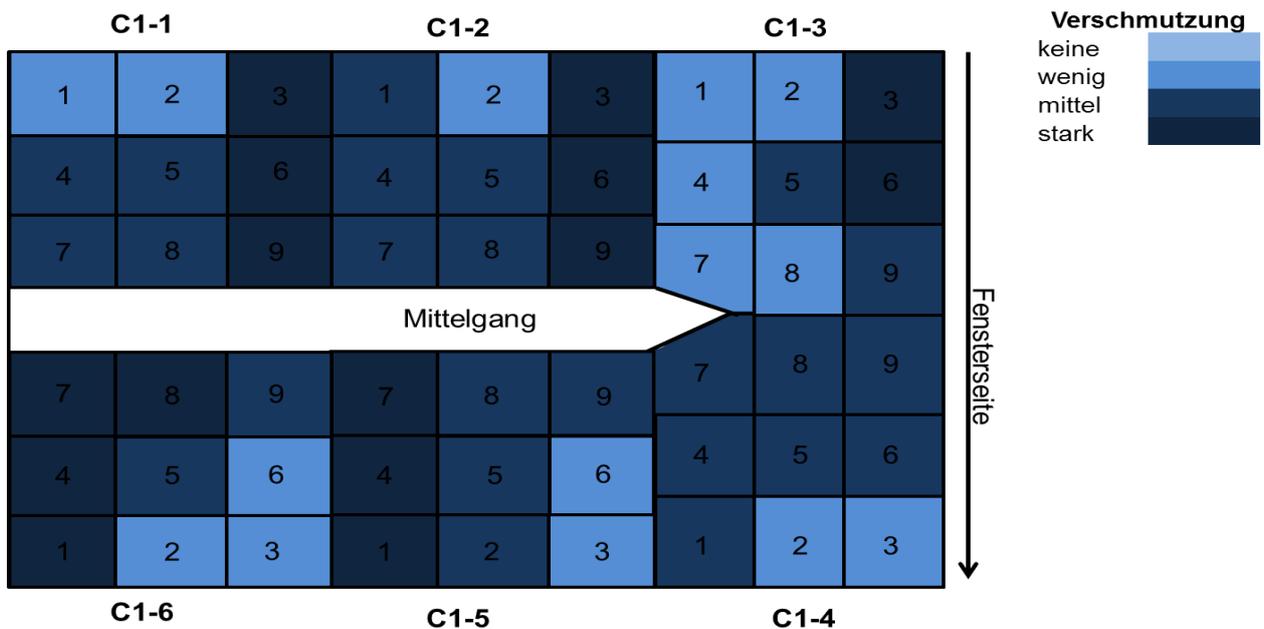


Abb. 79: Ø Buchtenverschmutzung (Bereiche 1 bis 9) über alle Beobachtungen in Abteil C1 (Referenz). Zusammenfassung des zweiten Versuchszeitraums (16 Beobachtungstage 2012).

Anhand der Verschmutzung des Referenzabteils ist zu erkennen, dass die Verschmutzung im Vergleich zum ersten Versuchszeitraum zugenommen hat. Wieder besteht ein Unterschied in der Verschmutzung zwischen den Buchten der rechten und linken Seite des Abteils. Klarer strukturiert waren die Buchten des ersten Versuchszeitraums.

Auch im zweiten Versuchszeitraum wurde die Buchtenverschmutzung zu jedem Beobachtungstermin aufgenommen. Im Vergleich zu dem ersten Versuchszeitraum lässt sich in Abb. 80 ein ähnliches Bild im Verlauf der Beobachtungstage (20 Beobachtungstage) erkennen. Klar zu erkennen sind die erneut stärker und schwächer verschmutzten Flächen jeder Bucht. Diese Abbildung des Abteil B1 (Kühlpad) steht stellvertretend für alle übrigen Abteile des zweiten Versuchszeitraums (vgl. Abb. A 8 bis Abb. A 10).

4.5.1.5 Integumentbeurteilung

Bei der Integumentbeurteilung wurden der Verschmutzungsgrad der Tiere und der Zustand des Tierkörpers beurteilt. Die Beobachtung der Verschmutzung der Tiere sowie Verletzungen an Schwänzen und Ohren können Aufschluss über den Zustand und das thermische Wohlbefinden der Tiere geben. Zwischen den einzelnen Versuchsabteilen konnte jedoch auch hier kein nennenswerter Unterschied erkannt werden. Aufgrund des Zustands der Körper der Tiere konnten keine Rückschlüsse auf ein bestimmtes Kühlungs- und Lüftungssystemen gezogen werden.

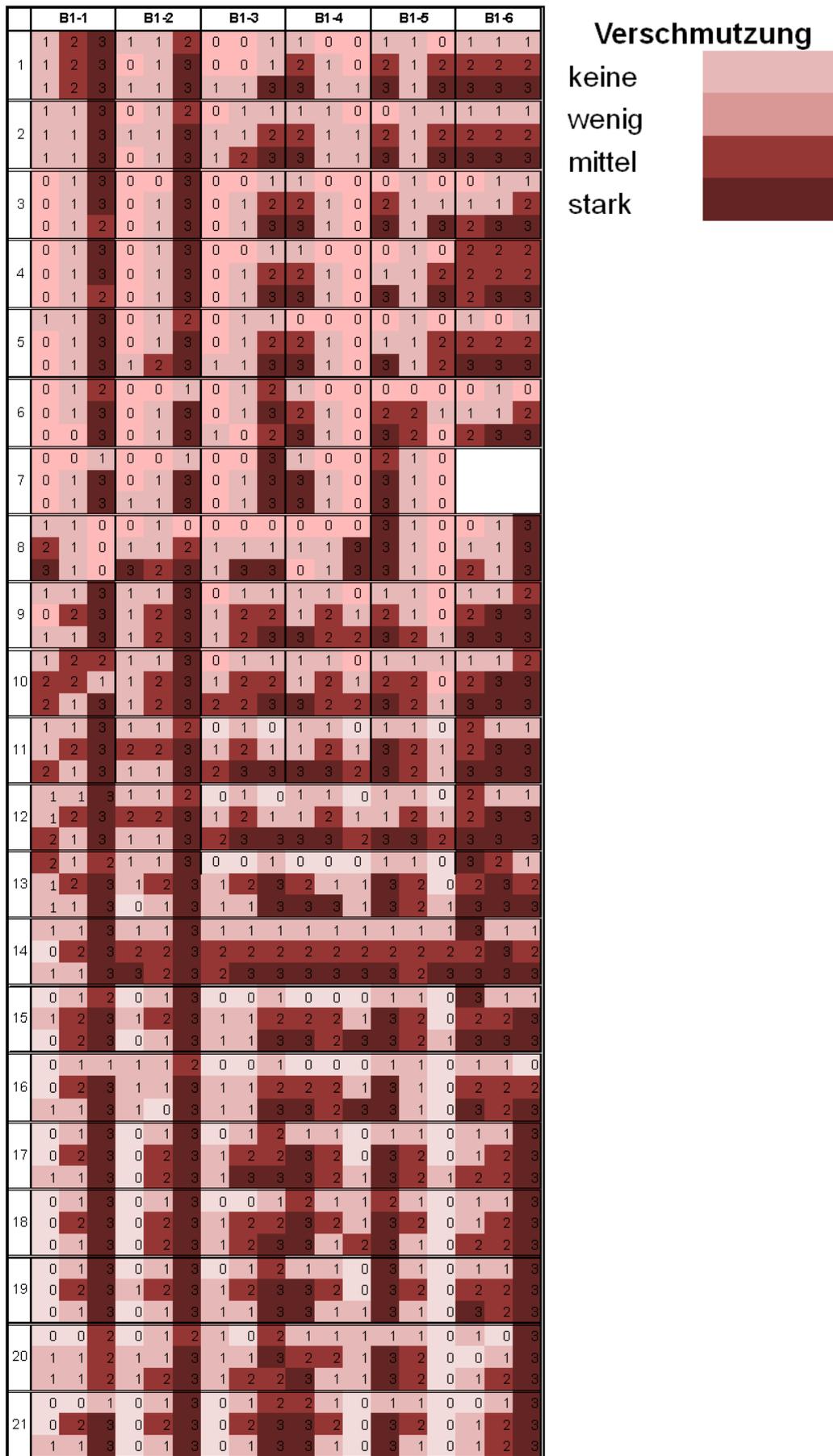


Abb. 80: Entwicklung der Buchtenverschmutzung innerhalb des Abteils B1 (Kühlpad) im zweiten Versuchszeitraum (21 Beobachtungstage 2012).

4.5.2 Diskussion des Tierwohls

4.5.2.1 Atmungsverhalten

Diskussion des Atmungsverhaltens (2011)

Der Vergleich der Abteile verdeutlicht, dass die Tiere in Abteil B1 (Kühlpad) über den Versuchsverlauf hinweg am häufigsten Husten zeigten. Dies könnte an den relativ geringen Temperaturen und hohen relativen Luftfeuchten in diesem Abteil zur Zeit der Beobachtung liegen. Durch zu hohe relative Luftfeuchten bei verhältnismäßig geringen Temperaturen können Erkältungen hervorgerufen werden, wohingegen bei einer zu geringen relative Luftfeuchte die Gefahr von Atemwegserkrankungen besteht (PRANGE, 2004; HOY ET AL., 2006).

Neben Temperaturen und Luftfeuchten könnte auch Staub die Ursache für die hustenden Tiere in den verschiedenen Abteilen sein. BRAUN (1997) und MAYER (1999) sehen den Gehalt an Schwebstaub als Ursache für hustende Tiere in zwangsbelüfteten Ställen an. Die meisten hechelnden Tiere wurden in den Abteilen C3 (Unterflur) und C1 (Referenz) beobachtet. Sie sind ein Indikator für zu hohe Körpertemperaturen bzw. eine ungenügende Aufnahme von Sauerstoff und Abgabe von Kohlenstoffdioxid. Da es innerhalb des Versuchszeitraumes jedoch sehr selten zu Temperaturen oberhalb der 30°C kam, kann es sich bei pumpenden Schweinen auch um eine verringerte Elastizität der Lunge durch Narbenbildung handeln (HULSEN & SCHEEPENS, 2006). Dagegen sprechen allerdings die geringen Lungenbefunde der Schlachtauswertung. Möglich ist aber auch, dass die Unterflurzuluft des Abteil C3 (Unterflur) nicht ausreichte, um den Tieren eine Temperatur in ihrem Komfortbereich zur Verfügung zu stellen. Die Lüftung des Abteils C1 (Referenz) war in diesem Zeitraum zudem häufig nicht in der Lage, Temperaturspitzen abzufangen.

Deutlich wurde, dass die Tiere des Abteils C3 (Unterflur) insgesamt die meisten Probleme bei der Atmung zeigten. Die Luft in diesem Abteil war häufig als zu trocken anzusehen. Auch lag die Ammoniakkonzentration im Tierbereich dieses Abteils zum Beobachtungszeitpunkt häufig über dem Grenzwert von 20 ppm. Ammoniak hat eine starke Wirkung auf die Schleimhäute der Tiere, zudem ist seine Konzentration stark von der Hygiene abhängig (ESTERMANN, 2010).

Widersprüchlich war jedoch, dass, entgegen dieser Beobachtungen, das Abteil C3 (Unterflur) das zweitsauberste Abteil darstellte.

Innerhalb der Abteile zeigten einige Beobachtungstage besonders viele Tiere mit Hechelatmung oder Husten. Anhand der Kontinuität, Temperaturen, Luftfeuchten und Schadgas-

gehalte kann je nach Anteil von einer Erkrankung der Tiere oder Hitzestress ausgegangen werden. In Anteil B1 (Kühlpad) husteten die Tiere vermehrt innerhalb der ersten Beobachtungstage. Durch die Kontinuität der hustenden Tiere und der relativ geringen Temperaturen, hohen Luftfeuchten und geringen Ammoniakkonzentrationen kann hier beispielsweise von einer Erkrankung der Tiere ausgegangen werden.

Diskussion des Atmungsverhaltens (2012)

Anhand der Abb. 74 ist zu erkennen, dass sich die Tiere der Versuchsabteile des zweiten Versuchszeitraums in ihrem Atmungsverhalten deutlich unterschieden.

Näher betrachtet werden soll in diesem Rahmen jedoch nur der Praxisbetrieb A (EWT). Die Tiere des Praxisbetriebs A (EWT) zeigten mit 3,4% die meiste Hechelatmung während des gesamten Versuchszeitraums. Interessant ist, dass die Tiere dieses Abteils die vermehrte Hechelatmung nicht an den beobachteten besonders heißen Tagen zeigten, sondern über den gesamten Versuchszeitraum hinweg. Die Beobachtung der vermehrten Hechelatmung passt jedoch auch mit der später aufgeführten Buchtenverschmutzung zusammen. Die in Absatz (Bewertung des Atmungsverhaltens (2011)) beschriebenen Ursachen für ein bestimmtes Atmungsverhalten beziehen sich auch auf den zweiten Versuchszeitraum. Dennoch konnte hier kein Zusammenhang zwischen der Hechelatmung, der Temperatur, der Schadgaskonzentration u.a. festgestellt werden. Mögliche Ursache könnte der zum Teil geringe Luftvolumenstrom des Abteils gewesen sein.

Es wurde auf einzelne Tiere ein Einfluss der Kühlung beobachtet. Doch die geringe Anzahl heißer Untersuchungstage bzw. das Fehlen einer länger andauernden Hitzeperiode lässt hier keine detaillierte Aussage zu.

In dieser Untersuchung wurde die Staubkonzentration nicht gemessen. Hohe Staubkonzentrationen können auch zu Lungenproblemen führen, was wiederum Einfluss auf die Atmung hat (HARTUNG, 2002).

4.5.2.2 Buchtenverschmutzung

Diskussion der Buchtenverschmutzung (2011)

Anteil B1 (Kühlpad) stellte das schmutzigste Anteil dar. Dieses Ergebnis stimmt auch mit der Anzahl wenig bis mittel verschmutzter Tiere überein. Die Schadgaskonzentrationen dieses Abteils lagen unter oder inmitten der Durchschnittswerte der anderen Abteile. Die Stalltemperatur lag sogar unterhalb der Durchschnittstemperaturen der anderen Abteile. Auch deutete die klar strukturierte Bucht nicht auf Temperaturprobleme in diesem Anteil

hin, lediglich die Luftfeuchte war in diesem Abteil durchschnittlich höher als die der anderen Abteile. Laut GRAUVOGEL (1986) suchen sich die Tiere zum Koten feuchte, helle und übersichtliche Plätze. Ein Grund für die stärkere Verschmutzung könnte das am Beobachtungstag höhere Tiergewicht zu den anderen Abteilen gewesen sein sowie das damit einhergehende geringere Platzangebot, wie bereits von HULSEN & SCHEEPENS (2006) beschrieben wird.

In Abteil C2 (HDB) wurden die meisten stark verschmutzten Schweine festgestellt. Dies könnte an der höheren Feuchte bei Einsetzen der Sprühanlage liegen. So kann das versprühte Wasser vielleicht nicht immer komplett von der Luft schnell genug aufgenommen werden und sinkt zu Boden. Dort erzeugt es eine feuchte Oberfläche, was zu keiner einheitlichen Buchtenstrukturierung führte (BOXBERGER et al., 1994) (siehe Anhang Abb. A 2 und Abb. A 4).

Die Tiere des Abteils C3 (Unterflur) hingegen stellten die saubersten Tiere dar. Zugleich war die durchschnittlichen Temperaturen in Abteil C3 (Unterflur) zu den Beobachtungsterminen häufig oberhalb der Komfortzone der Tiere lagen. Auch die Konzentration an Ammoniak wurde in diesem Abteil im Beobachtungszeitraum öfters überschritten. Dies würde normal den Schluss zulassen, dass sich die Tiere eine zusätzliche Möglichkeit zur Abkühlung geschaffen hätten bzw. nach den Beobachtungen von PFLANZ (2007) es zu einer größeren Buchtenverschmutzung gekommen wäre. Das folgende Kapitel 4.8 zeigt auch, dass der Schadgassensor im Unterflurabteil nicht optimal platziert war, sodass die Schadgaskonzentrationen keine sichere Aussage zulassen. Weiterhin hat sich gezeigt, dass die Frischluft direkt zu den Tieren wanderte, sodass die Buchtenabschnitte nahe dem Versorgungsgang stets frische Luft hatten.

Grundsätzlich konnte im Vergleich der Buchten eine Strukturierung erkannt werden. Anhand der Verschmutzung war erkennbar, zu welchem Zeitpunkt die Tiere eingestallt wurden, wann sie sich in der Mitte der Mast befanden und wann bereits schwere Tiere aus den Buchten entfernt wurden. Als ein gutes Beispiel dient die Abb. 77.

Alle beobachteten Abteile zeigten eine ähnliche Entwicklung. Lediglich die Buchten innerhalb eines Abteils zeigten Unterschiede, welche sich jedoch nur schwer erklären lassen. Denkbar wäre ein unterschiedliches Mikroklima innerhalb der verschiedenen Buchten, welches sich jedoch mit der eingesetzten Messtechnik nicht messen ließ. Eine weitere Ursache stellen die unterschiedlichen Geschlechter der Tiere dar. Laut HULSEN & SCHEEPENS (2006) verschmutzen männliche Tiere schneller ihre Bucht als weibliche Tiere. Diese Merkmale wurden hier jedoch nicht weiter untersucht.

Diskussion der Buchtenverschmutzung (2012)

Innerhalb des zweiten Versuchszeitraums wurde ebenfalls an jedem Beobachtungstag ein Verschmutzungsprofil der Buchten erstellt. Auch im zweiten Versuchsabschnitt lassen sich eine gute Buchtenstrukturierung und die verschiedenen Mastabschnitte anhand der Buchtenverschmutzung erkennen. Die Beobachtungen von GRAUVOGEL (1986) lassen sich auch hier bestätigen (siehe Diskussion der Buchtenverschmutzung (2011)). Anhand von Abb. 80 ist zu sehen, dass die Tiere des Kühlpadabteils nach dem siebten Beobachtungstag ausgestallt wurden. Die Beobachtungstage davor zeigen eine durchschnittlich mittlere Verschmutzung der Abteile, was sich durch den bereits abgenommen Tierbesatz innerhalb des Abteils erklären lässt. Ungefähr eine Woche vor dem achten Beobachtungstag wurden neu eingestallt. Erkennbar ist, dass die Verschmutzung des Abteils mit zunehmendem Tiergewicht zwischen dem achten und fünfzehnten Beobachtungstag immer größer wird (vgl. HULSEN & SCHEEPENS (2006)). Bei den Endmasttieren ist wiederum ein Rückgang der Verschmutzung zu verzeichnen, da die Buchten durch das Ausstellen einzelner Tiere immer leerer werden und den verbleibenden Tieren mehr Platz zur Verfügung steht. Zu sehen ist dies, mit leichter Verzögerung, ab dem 17. Beobachtungstag. Der 20. Beobachtungstag stellt mit einer Außenhöchsttemperatur von 36,2°C den heißesten Versuchstag dar. An diesem Tag wurden eine Abteiltemperatur von 27°C und eine Abteilfeuchte von 69,6% gemessen. Eine Mehrverschmutzung der Buchten ist hier und an der darauffolgenden Beobachtung jedoch nicht erkennbar, was für das gute Funktionieren des Kühlpads in diesem Abteil spricht. Die Verschmutzungsprofile der anderen Versuchsabteile zeigen alle ein ähnliches Bild. Lediglich das Abteil C2 (HDB) zeigt zwei Tage nach diesen Außenhöchsttemperaturen eine deutliche Mehrverschmutzung der Buchten (siehe Anhang Abb. A 9). Hier lag die Abteiltemperatur noch zwei Tage später bei 28,7°C und die Abteilfeuchte betrug 63,1%. Daraus lässt sich schließen, dass die Hochdruckbefeuchtung nicht in der Lage ist, Temperaturspitzen zuverlässig und schnell abzufangen. Gleiches fällt bei Praxisbetrieb A (EWT) auf. Ähnlich wie im Abteil mit der Hochdruckbefeuchtung (C2) schaffte es auch der Erdwärmetauscher des Betriebes A (EWT) an dem Beobachtungstag nicht, die Abteiltemperatur nach heißen Tagen schnell und zuverlässig herabzukühlen. Dies wird auch anhand der vermehrten Buchtenverschmutzung dieses Abteils an diesem Beobachtungstag sichtbar (siehe Anhang). Grund dafür kann auch die geringe Luftrate sein.

Die anderen zwei Praxisbetriebe konnten während der heißen Zeit nicht beobachtet werden. Das Verschmutzungsprofil dieser Betriebe ist dennoch im Anhang (Abb. A 11; Abb. A 12; Abb. A 13) aufgeführt.

Abschließend lässt sich sagen, dass das Tiergewicht, der Tierbesatz und die Abteiltemperatur den größten Einfluss auf die Verschmutzung der Buchten hatten. Ein klarer Zusammenhang zwischen Buchtenverschmutzung und Schadgaskonzentrationen innerhalb der Versuchsabteile konnte, zumindest auf dem in diesem Versuch gemessenen Niveau, nicht festgestellt werden. Auch für den zweiten Versuchsabschnitt ist der Einwand von HULSEN & SCHEEPENS (2006), im Hinblick auf die Verschmutzung auch das Geschlecht der Tiere zu berücksichtigen, sinnvoll. Dieses Merkmal wurde jedoch in diesem Abschnitt nicht fokussiert.

4.6 Ressourceneffizienz

Die Ressourceneffizienz wird anhand des Stromverbrauchs der Abluftventilatoren und der Kühlungsanlagen (Pumpen), des Wasserverbrauchs, des Wärmeverbrauchs bzgl. des rechnerisch ermittelten Wärmegewinns und der Kühlleistung beurteilt. Der Wasserverbrauch spielt nur bei den auf Befeuchungskühlung basierenden Systemen eine Rolle. Die Verbrauchswerte wurden bis Ende Dezember 2012 (Ahlborn Messwerterfassung Ende Sep. 2012) erfasst und ausgewertet.

Da die Ressourceneffizienz sehr stark mit der Wirtschaftlichkeit verbunden ist, wird die dazugehörige Diskussion zusammen mit der Wirtschaftlichkeit unter Kapitel 4.7.2 diskutiert.

4.6.1 Stromverbrauch

4.6.1.1 Stromverbrauch an der LSZ Boxberg

Ventilatoren

Die jahreszeitlich bedingte Schwankung im Stromverbrauch zwischen Sommer und Winter ist in Abb. 81 zu sehen. Insgesamt war der Stromverbrauch im Jahr 2012 etwas höher als im Vorjahr. So wurden im Jahr 2011 1209,6 kWh (Kühlpad), 1192,6 kWh (Referenzabteil), 1375,2 kWh (HDB) und 871,3 kWh (Unterflurlüftung) verbraucht. Im Folgejahr waren es 1527,2 kWh beim Kühlpad, 1699,1 kWh beim Referenzabteil, 1741,8 kWh bei der HDB und 923,3 kWh bei der Unterflurlüftung. Zwischen den Abteilen sind auch in den einzelnen Monaten große Unterschiede zu sehen. Diese Unterschiede entstanden durch die unterschiedlichen Ein- und Ausstalltermine (siehe Abb. 12).

Das System der Unterflurzuluft weist in beiden Jahren den geringsten Stromverbrauch auf. Exemplarisch wird dies am Monat August deutlich. Lediglich vom Ventilator des Referenz-

abteils wurde 2011 weniger Energie, bedingt durch das zum Teil leer stehendes Abteil in dem Monat, benötigt. Im Abteil Kühlpad und Hochdruckbefeuchtung waren weniger Tiere eingestallt, somit weisen beide ein geringeres Abteilgewicht als das Unterflurabteil auf. Dennoch war der Stromverbrauch bei Kühlpad- und Hochdruckbefeuchtungsabteil höher. Nahezu gleiches zeigt sich auch im August des Jahres 2012. In diesem Monat trat das höchste Abteilgewicht im Kühlpadabteil auf, dies spiegelt sich auch im Stromverbrauch wider. Diesbezüglich ist die Unterflurlüftung im Vergleich zum Referenzabteil sehr sparsam. Im Referenzabteil waren zu diesem Zeitpunkt die meisten Tiere ausgestallt, dennoch ist der Energiebedarf der Lüftung fast gleich hoch (vgl. Abb. 12 und Abb. 81).

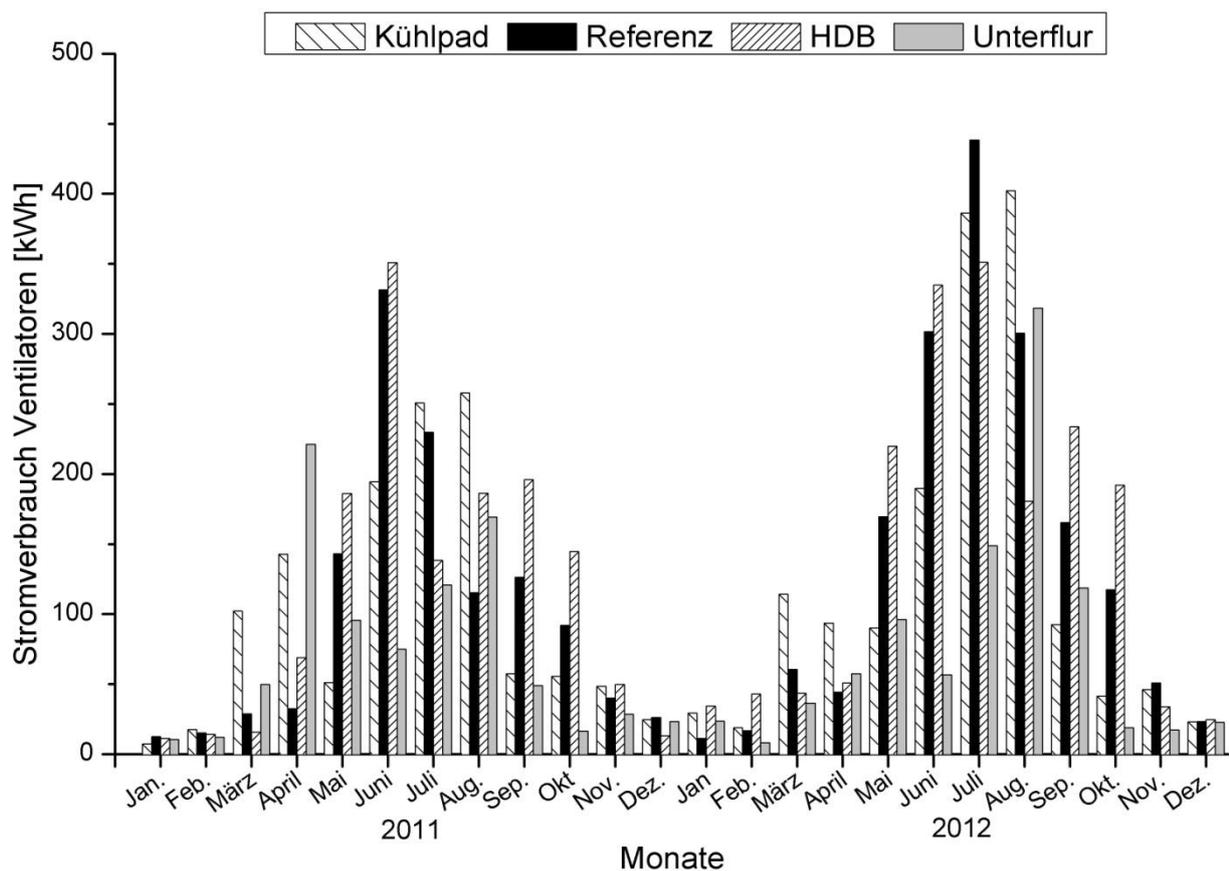


Abb. 81: Monatlicher Stromverbrauchs der Ventilatoren über die Jahre 2011 und 2012. (HDB= Hochdruckbefeuchtung)

Beispiel Einzeltag

Um den Stromverbrauch der Abteile bei einer Lüfterleistung von 100% vergleichen zu können, wird beispielhaft der 19. August 2012 als wärmster Tag ($\varnothing 27,4^{\circ}\text{C}$ Außentemperatur) dargestellt (Abb. 82). An diesem heißen Tag lief die Lüftungssteuerung der Abteile Kühlpad, Referenzabteil und Unterflurzuluft den ganzen Tag auf 100%. Ausschließlich bei dem Abteil mit der Hochdruckbefeuchtung senkte die Lüftungssteuerung die Lüfrate im

Laufe des Morgens ab. In diesem Abteil waren junge Tiere, die einen höheren Sollwerttemperaturanspruch hatten. Es zeigte sich, dass bei gleichem Stromverbrauch pro Stunde das Referenzabteil einen höheren Volumenstrom pro Stunde hatte. Auch hatte die Unterflurluft (Lüftereinstellung 100%) einen etwas geringeren Stromverbrauch, zugleich war der Luftvolumenstrom am höchsten. Weitere Tagesauswertungen ergaben ähnliche Schaubilder.

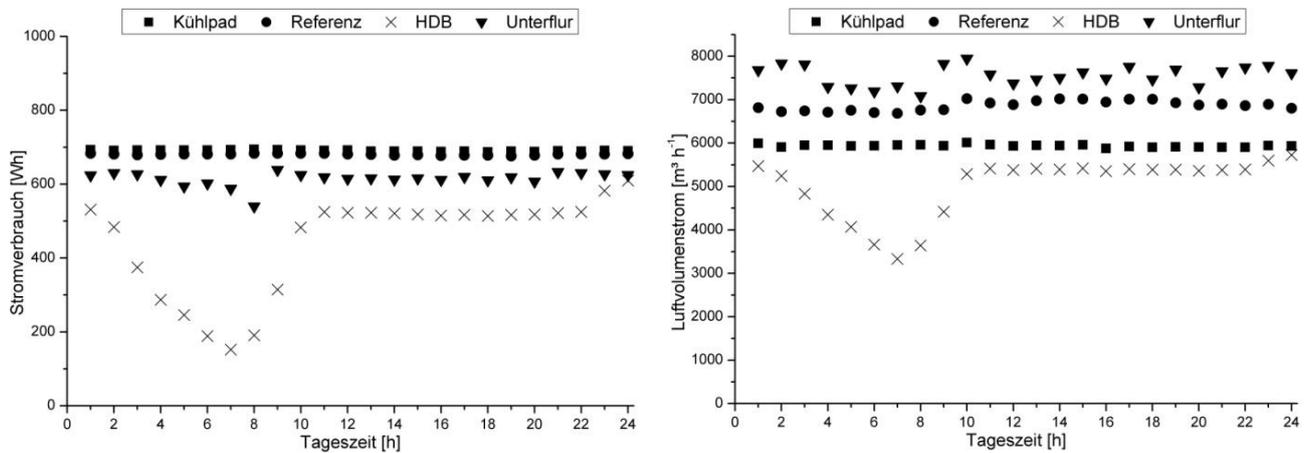


Abb. 82: Darstellung des Stromverbrauchs pro Stunde der Ventilatoren (links) und des Volumenstroms pro Stunde (rechts) vom 19. August 2012. (\varnothing 27,4°C Außentemperatur) (HDB= Hochdruckbefeuchtung)

Kühlung

Einen zusätzlichen Verbrauch an Strom bringen die Hochdruckbefeuchtung und das Kühlpad mit sich. Hier verbrauchen die Wasserpumpen den Strom. Die folgenden Ergebnisse lassen sich zum größten Teil aus dem Verbrauch während der Sommerzeit zusammensetzen, da der Betrieb von Kühlpad und Hochdruckbefeuchtung im Winter von untergeordneter Bedeutung ist.

Zur Kühlung benötigt das Kühlpad einen Strombedarf von 393,6 kWh im Jahr 2011 pro Abteil. Im Folgejahr sank der Bedarf durch die veränderte Ansteuerung (bei 24°C ein statt 21°C Außentemperatur und erst ab 2012 bei 80 % rel. Abteilluftfeuchte ausschalten) auf 174,1 kWh je Abteil. Im Vergleich dazu lag der Verbrauch der Hochdruckbefeuchtung im Jahr 2011 bei 189,4 kWh. Hier ist der Verbrauch an Strom im Jahr 2012 ebenfalls gesunken und lag bei 159,3 kWh.

4.6.1.2 Stromverbrauch auf den Praxisbetrieben

In der Abb. 83 sind die Stromverbräuche der Ventilatoren auf den Praxisbetrieben dargestellt. Die Messwerte stammen aus einem Zeitraum von einer Stunde, in der die Lüfterleistung bei 100% lag. Das heißt auf den Praxisbetrieben A (EWT ein Ventilator), B (Unterflur zwei Ventilatoren) und C (HDB vier Ventilatoren) (vgl. Tab. 17) liefen alle Lüfter unter Vollast. Auf dem Betrieb A (EWT) liefen gleichzeitig auch die 13 Ventilatoren der Nachbarabteilen auf 100% Lüfterleistung. Dabei verbrauchte der Betrieb A (EWT) auf den Tierplatz bezogen mit 4,7 Wh den wenigsten Strom und Betrieb B (Unterflur) mit 10,2 Wh den meisten. Bezogen auf einen Luftvolumen von beispielhaft 100 m³ hat die der Betrieb A den höchsten Verbrauch. Dieser benötigt 17,6 Wh um 100 m³ bei 100% Lüfterleistung in bzw. aus dem Abteil zu fördern. Dagegen benötigten Betrieb B (Unterflur) für dieselbe Menge 9,0 Wh und Betrieb C (HDB) 5,7 Wh für die 100 m³ Luft in und aus dem Abteil zu befördern.

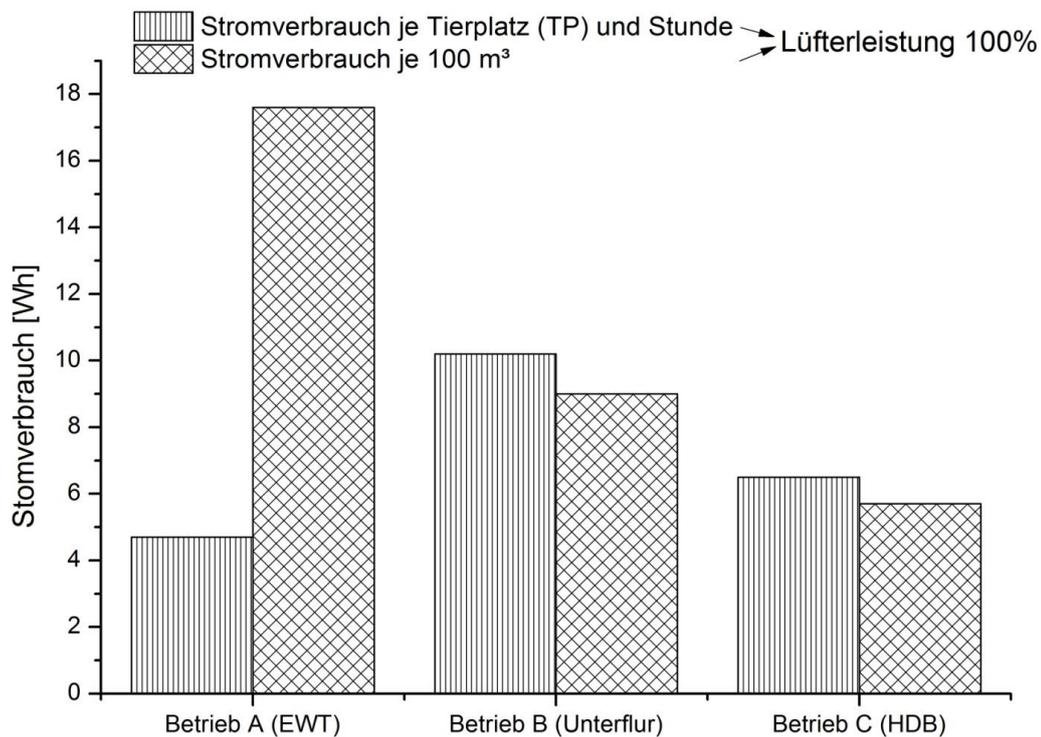


Abb. 83: Vergleich des Stromverbrauchs der Ventilatoren bei 100% Lüfterleistung für eine Stunde mit dem Bezug auf den Tierplatz und als weiterer Vergleich der Stromverbrauch bei 100% Lüfterleistung für die Förderung von 100 m³ Luft von den Praxisbetrieben Erdwärmetauscher (EWT), Unterflurzuluft und Hochdruckbefeuchtung (HDB).

Bei der Gegenüberstellung des Luftvolumenstroms bei einer Lüfterleistung von 100% und dem dazu gemessenen Stromverbrauchs so wie dem Unterdruck in den Abteilen (Mess-

zeitraum eine Stunde) zeigt sich, dass bei dem Betrieb A (EWT) wie im Absatz zuvor der Stromverbrauch je Tierplatz am geringsten ist. Dabei ist aber die geförderte Luftmenge die niedrigste in der Abb. 84. Zugleich zeigt sich, dass dieses Lüftungssystem im Vergleich zu den Lüftungssystemen von Betrieb B mit einer Unterflurzulufführung und Betrieb C (HDB) mit einer Strahl Lüftung der Zuluft einen wesentlich geringeren Widerstand bieten. Die Betriebe B (Unterflur) und C (HDB) unterscheiden sich in Abb. 84 da hingehend, dass Betrieb B (Unterflur) trotz eines geringeren Unterdruckes im Abteil zugleich einen höheren Stromverbrauch und einen geringeren Luftvolumenstrom aufweist. Die Gründe dieses Unterschiedes werden im Kapitel 4.7.2 diskutiert.

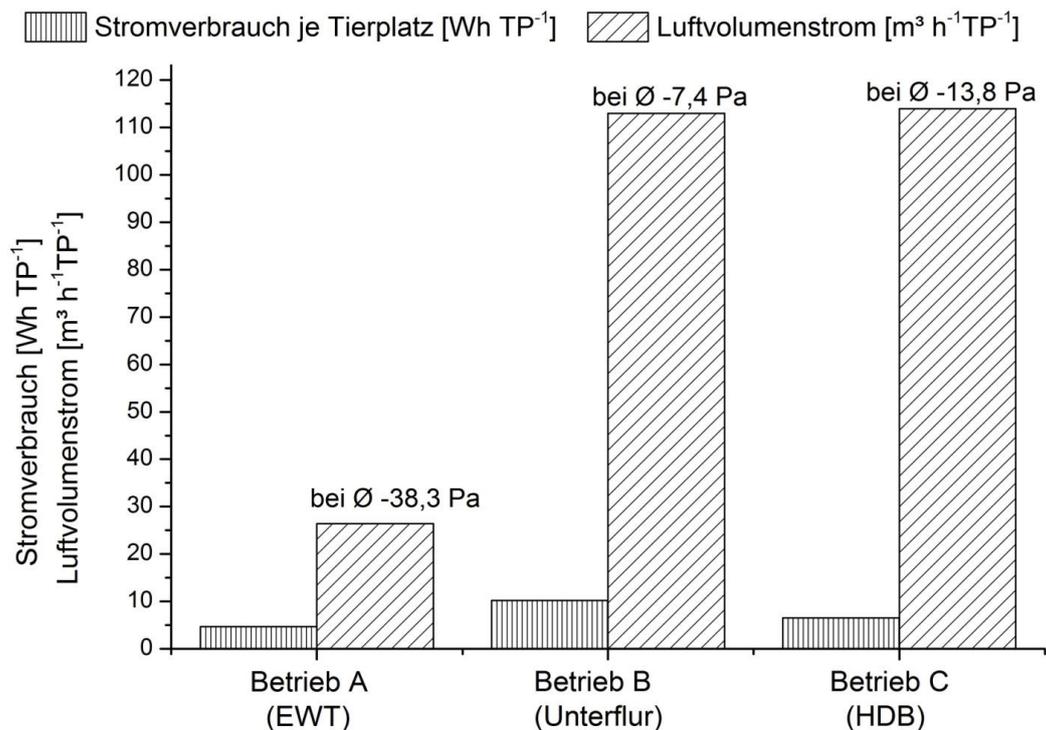


Abb. 84: Vergleich des Stromverbrauchs, des Luftvolumenstroms und des herrschenden Δp Unterdruckes im Abteil bei 100% Lüfterleistung für eine Stunde zwischen von den Praxisbetrieben Erdwärmetauscher (EWT), Unterflurzuluft und Hochdruckbefeuchtung (HDB).

4.6.2 Wasserverbrauch

Kühlung

Bei der Unterflurlüftung wird Wasser nicht direkt zur Kühlung der Luft benötigt. Dennoch verdunsten im Monat ca. 390 Liter, die einmal monatlich in den Zuluftkanal eingespeist werden. Dies sollte einen weiteren Kühleffekt haben, was sich aber nicht messbar gezeigt hatte. Das Kühlpad hatte im Jahr 2011 mit 22941 l den höchsten Wasserverbrauch, aber auch im Jahr 2012 lag es mit 16233 l über dem der Hochdruckbefeuchtung. Diese ver-

brauchte im Jahr 2011 10034 Liter und ein Jahr später 5732 l. Dabei ist bei beiden Systemen der meiste Verbrauch in den Monaten Mai und August der Jahre 2011 und 2012 zu verzeichnen.

Wasserverbrauch der Tiere

Der totale Wasserverbrauch der Tiere ist von Jahr zu Jahr und von Abteil zu Abteil unterschiedlich (siehe Tab. 33). Zur Vergleichbarkeit wurden die Verbrauchswerte auf den Verbrauch je Großvieheinheit umgerechnet. Das Ergebnis wies keine Unterschiede zwischen Referenz-, Hochdruckbefeuchtungs- und Unterflurzuluftabteil auf. Lediglich beim Kühlpadabteil wurde ein etwas geringerer Wasserverbrauch festgestellt. Der Einfluss von defekten Nippeltränken und verstopften Tränken konnte bei den Berechnungen nicht berücksichtigt werden.

Tab. 33: Tränkwasserverbrauch pro Abteil und Jahr.

	Kühlpad	Referenz	Hochdruckbefeuchtung	Unterflur
Wasserverbrauch	[l]			
2011	93865	89896	104740	94530
2012	85474	91519	90851	92185

4.6.3 Wärmeverbrauch

Der Wärmeverbrauch der Abteile wird in zwei Teilen präsentiert. Der erste Teil zeigt die gemessenen Verbrauchswerte. Im zweiten Teil werden die Wärmegewinnung und die Wärmeverluste fokussiert.

Wärmeverbrauchszähler

Tab. 34 zeigt einen sehr niedrigen Wärmeverbrauch beim Kühlpadabteil im Jahr 2011. Dieser kam zustande, da die Einstalltermine (Aufheizen) nicht in die kalte Zeit des Jahres fielen. Unter Aufheizen versteht man die ein bis zwei Tage nach der Reinigung, in denen die Heizung im Abteil auf 100% gestellt wird, damit das Abteil trocknet und die Bodenfläche erwärmt werden. Neben der Heizung für den Mastzeitraum wurden zum Aufheizen auch noch die im Abteil an den Längswänden befindlichen Wastraplatten eingeschaltet, deren Verbrauch auch gemessen wurde. Da die Wastraplatten in jedem Abteil gleich zum Aufheizen verwendet wurden, wurden sie in der folgenden Tabelle nicht berücksichtigt.

Den höchsten Verbrauch erzielte das Referenzabteil im Jahr 2012. Dabei ist die Plausibilität des Wertes nicht gesichert. So konnte nicht rückverfolgt werden, ob in dem Abteil wirklich für eine längere Zeit als bei den anderen Abteilen die Heizung eingeschaltet war. Abgesehen vom Wert des Kühlpads hatte die Hochdruckbefeuchtung in den zwei Jahren jeweils den niedrigsten Wärmebedarf.

Tab. 34: Energieverbrauch der Heizungen aller Abteile der Jahre 2011 und 2012. (HDB= Hochdruckbefeuchtung)

	Kühlpad	Referenz	HDB	Unterflur
Wärmemengenverbrauch	[kWh]			
2011	3408	9704	7840	8265
2012	11284	(24658)	9216	9796

4.6.4 Wärmegewinn und Kühlleistung

4.6.4.1 LSZ Boxberg

Berechnung der Wärmegewinnung

Anhand der Temperatur- und Luftvolumenstrommesswerte lässt sich der Wärmegewinn der Unterflurlüftung berechnen. Dieser bezieht sich auf das Kanalstück im Bauteil C zwischen den Messpunkten (2) und (3), die in der Abb. 55 gezeigt sind. Dabei wird auf die Messwerte bei einer Außentemperatur unterhalb von 10°C zurückgegriffen. Im Jahr 2011 wurde auf diesem Weg die Luft um 8278,6 kWh erwärmt, im Jahr darauf waren es 5328,5 kWh.

Bei der Beschreibung der Abteile wurde bereits die Anzahl an Außenwänden jedes Abteils genannt. Das Abteil mit der Hochdruckbefeuchtung hat zwei Außenwände, während alle anderen drei Außenwände besitzen. Die Nordwand des Referenz- und Kühlpadabteils schließt an das Bauteil A an, welches nicht beheizt, aber frostsicher ist. Die Südwand des Unterflurzuluftabteils ist eine „reine“ Außenwand. Zusätzlich sind in diese noch zwei Fenster eingelassen, welche 880 kWh im Jahr 2011 und 614 kWh im Jahr 2012 Wärmeverlust verursachen. Über die Südwand selbst gingen Rechnerisch 2459 kWh (2011) und 1713 kWh (2012) verloren (vgl. Kap. 3.5.4 und Kap. 3.5.5). Zusammen wurde hier mit 3339 kWh für das Jahr 2011 und 2327 kWh für das Jahr 2012 ein höherer Wärmeverlust erreicht, als das Abteil mit der Hochdruckbefeuchtung aufwies.

Kühlleistung

Die Kühlleistung wurde einmal über die Temperaturdifferenz, was bei der Unterflurlüftung und dem Kühlpad möglich war, und ein anderes Mal über die Verdampfungsenergie von verbrauchtem Wasser berechnet. Der Berechnungszeitraum betraf nur die Sommermonate. Allen Berechnungen lag die Annahme zugrunde, dass die Wassertemperatur 15°C betrug und 100% des Wassers verdampften. Diese Rechnung war sowohl bei der Hochdruckbefeuchtung als auch beim Kühlpad möglich. Es ergaben sich bei dem Kühlpad rechnerisch zwei Ergebnisse (vgl. Kap. 3.5.4 und Kap. 3.5.5). Aus Tab. 35 wird ersichtlich, dass zwischen den zwei Berechnungsarten große Unterschiede liegen.

Tab. 35: Energetische Angabe zur Kühlung der verschiedenen Kühlungssysteme. (HDB= Hochdruckbefeuchtung)

Jahr	Verdunstungsenergie des verbrauchten Wassers [kWh]		Abgabe der Wärmemenge zum Erlangen der Temperaturdifferenz ΔT [kWh]	
	HDB	Kühlpad	Kühlpad	Unterflur ¹
2011	6871	15710	6547	2712
2012	3925	11116	8040	3234

¹ Unterflurteilstück Bauteil C (Abb. 55) Punkt 2 bis 3. Von Punkt 1 – 2 nochmal ca. 1000 kWh

Aufgrund der Temperaturmessung entlang der Luftführung kann bei dem Kühlpad und der Unterflurlüftung die durchschnittliche Temperaturabnahme der Luft auf dem Weg von außen bis vor das Abteil berechnet werden. Die Temperaturabnahmen beim Kühlpad im Sommer 2011 betragen durchschnittlich -4,9 K und im Jahr darauf -5,2 K. Die Unterflurlüftung erreichte eine durchschnittliche Abkühlung von -3,6 K im Jahr 2011 und -3,4 K im Jahr 2012.

4.6.4.2 Praxisbetriebe

Wärmegewinn

Für die Berechnungen der Wärmegewinnung wurden die Temperaturmesswerte des Zeitraums verwendet, in dem die Außentemperaturwerte unter 10°C lagen. Bei Betrieb A (EWT) (ca. 3383 h $T_A < 10^\circ\text{C}$) ergab sich ein Wärmegewinn von 5197 kWh. Bei Betrieb B (Unterflur) (ca. 1733 h $T_A < 10^\circ\text{C}$) wurde ein Gewinn von 1689 kWh ermittelt. Da der Messzeitraum und die Abteilgröße auf den Betrieben unterschiedlich waren, wurden die Ergebnisse auf Stunde und Tierplatz umgerechnet. Daraus ergab sich für Betrieb A (EWT) ein

Wärmegewinn von $20 \text{ Wh TP}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Für Betrieb B (Unterflur) wurde $11 \text{ Wh TP}^{-1} \text{ h}^{-1}$ berechnet.

Kühlleistung

Gleich der Ermittlung des Wärmegewinns diene auch die Temperaturdifferenz von Zuluft und Außenluft zur Ermittlung der Kühlleistung für Betrieb A (EWT) und B (Unterflur). Hier wurden die Messwerte berücksichtigt, die bei einer Außentemperatur größer 22°C aufgezeichnet wurden. Die Kühlleistung bei Betrieb A (EWT) (ca. $975 \text{ h } T_{\text{A}} > 22^\circ\text{C}$) betrug 3785 kWh und bei Betrieb B (Unterflur) (ca. $616 \text{ h } T_{\text{A}} > 22^\circ\text{C}$) 1230 kWh . Umgerechnet auf Tierplatz und Stunde wurde $50 \text{ Wh TP}^{-1} \text{ h}^{-1}$ bei Betrieb A (EWT) und $25 \text{ Wh TP}^{-1} \text{ h}^{-1}$ bei Betrieb B (Unterflur) errechnet. Hierbei spielt bei Betrieb B (Unterflur) der Lufteinlass eine wichtige Rolle. Da im Sommer vermutlich mehr Luft durch den zweiten im Süden befindlichen Zulufteingang hereinströmt und dieser von dem Temperaturfühler im Unterflurkanal weiter entfernt ist, ist der Wert nur als hypothetisch möglich zu betrachten.

Bei Betrieb A (EWT) war die Kühlleistung im Vergleich zur Wärmegewinnung mehr als doppelt so hoch.

4.7 Wirtschaftlichkeit

4.7.1 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeit

In diesem Abschnitt sollen zunächst die aktuellen Mehrkosten der einzelnen Kühlungssysteme im Vergleich zum Referenzabteil aus den Messwerten errechnet werden. Im zweiten Teil soll eine Szenarioanalyse mit unterschiedlichen wirtschaftlichen und klimatischen Annahmen dargestellt werden.

Mehrkosten der Systeme

Im Jahr 2011 ergaben sich mit $3,02 \text{ €}$ für das Abteil mit der Unterflurzuluft die geringsten Mehrkosten je Tierplatz und Jahr (siehe Tab. 36). Diese Kosten setzen sich aus der Abschreibung, den zusätzlichen Baukosten und einem Ansatz für die Verzinsung von 8% zusammen. Da keine Wartung oder weitere Verbrauchsmittel bei diesem System nötig sind, fallen keine weiteren variablen Mehrkosten im Vergleich zum Referenzabteil an. Dadurch betragen auch im Jahr 2012 die Mehrkosten $3,02 \text{ € Tierplatz}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$. Für das Kühlpad beliefen sich die Mehrkosten auf $3,32 \text{ € Tierplatz}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$. Am teuersten war das Abteil mit eingebauter Hochdruckbefeuchtung. Hier beliefen sich die Zusatzkosten im Jahr 2011 auf $4,75 \text{ € Tierplatz}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$. Im Folgejahr wurden für das Kühlpad $2,92 \text{ € Tierplatz}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ berechnet, was im Vergleich zu den anderen Abteilen die geringsten Mehrkosten

bedeutete. Günstiger als im Vorjahr war 2012 die Hochdruckbefeuchtung mit 4,64 € Tierplatz⁻¹ Jahr⁻¹. Bei den hier berechneten Kosten sind die positiven Effekte, die zur Einsparung von Energie und den damit verbundenen Kosten führen können, noch nicht berücksichtigt.

Tab. 36: Mehrkosten der Abteile mit Kühlungssystem in Bezug zum Referenzabteil (ohne Kühlung) für die Jahre 2011 und 2012. Kosten setzen sich aus der Abschreibung, Verzinsung sowie Wasser- und Stromverbrauch zur Kühlung in den Jahren zusammen.

Mehrkosten der Kühlungssysteme bezogen auf das Referenzabteil			
	Kühlpad	Hochdruckbefeuchtung	Unterflur
Jahr	€ Tierplatz ⁻¹ Jahr ⁻¹		
2011	3,32	4,75	3,02
2012	2,92	4,64	3,02

Bei der Unterflurzuluft kann unter anderem durch die Erwärmung der Luft Energie gespart werden. In diesem Versuch ergab sich eine Einsparung von 3,97 € Tierplatz⁻¹ Jahr⁻¹ im Jahr 2011. Bis September des darauffolgenden Jahres waren es 2,58 € Tierplatz⁻¹ Jahr⁻¹. Hierbei wurde ein Gaspreis von 0,06 € kWh⁻¹ zugrunde gelegt. Ein Meter Unterflurkanal erbrachte somit eine Heizleistung von 288 kWh im Jahr 2011 bzw. 2,3 kWh Tierplatz⁻¹ Jahr⁻¹.

Weitere Einsparungen im Rahmen der Unterflurzuluft ergaben sich bezogen auf den Stromverbrauch der Abluftventilatoren. Tab. 37 zeigt die Kosten an Strom je Tierplatz und Jahr für den Stromverbrauch der Ventilatoren. Es wird ersichtlich, dass die Stromkosten des Unterflurabteils für die Ventilatoren am geringsten sind. Die geringste Einsparung im Vergleich zu den durch Porendecken gelüfteten Abteilen beträgt 0,49 €, die höchste Einsparung beträgt 1,25 €. Beim Referenzabteil fallen keine Zusatzkosten für eine Kühlung an, die bei der Unterflur hingegen 3,02 € Tierplatz⁻¹ Jahr⁻¹ ausmachen. Dem gegenüber steht die Ersparnis von mindestens 0,49 € hinsichtlich des Stromverbrauchs und einer Ersparnis von mindestens 2,58 € bei den Heizkosten. Somit kann eine Einsparung von 0,02 € € Tierplatz⁻¹ Jahr⁻¹ gegenüber dem Referenzabteil erreicht werden. Die Effekte der Kühlleistung wurden nicht berücksichtigt.

Tab. 37: Stromverbrauchskosten der Abluftventilatoren je Tierplatz und Jahr. (Strompreisannahme: 0,19 € kWh⁻¹).

Stromkosten des Ventilator auf den Tierplatz gerechnet				
	Kühlpad	Referenz	Hochdruckbefeuchtung	Unterflur
Jahr	€ (Tierplatz Jahr) ⁻¹			
2011	1,84	1,81	2,09	1,32
2012	2,32	2,58	2,65	1,40

Zum Ausgleich der Mehrkosten der einzelnen Systeme wäre eine höhere Tageszunahme (TZN) pro Abteil notwendig. Diese höheren Zunahmen wurden auf das Jahr gerechnet. Zusätzlich bezieht sich eine zweite Rechnung auf den warmen Zeitraum des Versuches, da in dieser Zeit alle Kühlsysteme aktiv waren und einen Einfluss auf das Stallklima hatten. Für die Berechnung wurde ein Schlachtpreis von 1,40 € festgelegt. Bei höheren Schlachtpreisen verringert sich die benötigte Tageszunahme in Tab. 38 zugunsten der Kühlungssysteme.

Tab. 38: Größenordnung, um die die Tageszunahmen zur Deckung der Mehrkosten der Kühlungssysteme nicht absinken dürfen, im Vergleich zum Referenzabteil. (Annahme: Schlachtpreis 1,40 € kg⁻¹, mindestens 82 Tage > 22°C)

Jahr	Kühlpad	HDB	Unterflur
	TZN [g]		
2011	8	11	7
2012	7	11	7
Sommerzeitraum			
2011	29	41	27
2012	25	40	27

Unter Berücksichtigung des Einsparpotentials der Unterflurzuluft muss das Referenzabteil sogar 1 g höhere Tageszunahmen haben, um auf den gleichen Deckungsbeitrag wie die Unterflurzuluft zu kommen.

Szenarioanalyse

Die Preise der einzelnen Szenarien sind in der folgenden Tabelle aufgelistet. Dabei verstehen sich unter dem Positivwert die aktuellen Energiepreise.

Tab. 39: Preise der Energiekosten bei unterschiedlichen Szenarien.

	Positivwert	Negativwert	Trendwert
Strom [€ kWh^{-1}]	0,19	0,33	0,26
Erdgas [€ kWh^{-1}]	0,06	0,09	0,07

Beispielhaft für die Kostendifferenzberechnung der Systeme zum Referenzabteil ist das Positivszenario mit den gegenwertigen Energiepreisen in der Tab. 40 aufgeführt. Die Energieverbräuche ergaben sich aus dem Mittelwert der zwei Untersuchungsjahre. Bei dem Kühlpad und der Hochdruckbefeuchtung ergaben sie sich aus dem Stromverbrauch der Pumpen. Bei der Unterflurzuluft ist dagegen die Stromersparnis der Ventilatoren aufgelistet. Die zweite Spalte der Unterflurzuluft beinhaltet die mögliche Heizersparnis. In der Summe ist die Unterflurlüftung unter Einbeziehung der Wärmenutzung günstiger als das Referenzabteil, aber auch ohne die Nutzung der Wärme ist sie mit $2,18 \text{ € TP}^{-1}\text{a}^{-1}$ das günstigste System. Alle weiteren Kostenberechnungen der einzelnen Energiepreisszenarien befinden sich im Anhang Tab. A 1 und Abb. A 2. Speziell die Unterflurlüftung profitiert von steigenden Energiepreisen. So werden die Mehrkosten zum Referenzabteil immer geringer, je höher die Strompreise werden. Unter Berücksichtigung der Wärmegewinnung ist die Unterflurlüftung in den Betriebskosten wesentlich günstiger als alle anderen Abteile.

Tab. 40: Mehrkostenberechnung der Kühlungssysteme im Bezug zum Referenzabteil unter der Annahme der aktuellen Energiepreise. Verbrauchswerte aus dem Mittelwert der Jahresverbräuche 2011 und 2012 gebildet.

Positivwerte (aktuelle Energiepreise)				
€ TP⁻¹	Kühlpad	HDB	Unterflur	Unterflur + Wärmenutzung
Abschreibung	0,77	3,11	2,91	2,91
Zinsansatz (8%)	0,03	0,12	0,11	0,11
Lohnkosten	1,77	1,08	-	-
Strom	0,43	0,27	-0,84	-0,84
Wasser	0,28	0,11	-	-
Heizersparnis	-	-		-3,28
Kostendifferenz zum Referenzabteil	3,28	4,70	2,18	-1,10

In der

Tab. 41 werden nur die Szenarioanalysen für den Sommerzeitraum gezeigt. In dieser Zeit müssen die Systeme den jeweiligen Effekt auf die Tageszunahme haben, damit sich die Mehrkosten rechnen. Hierzu wird ein Zeitraum von mindestens 82 Tagen vorausgesetzt, in dem die Außentemperatur größer 22°C ist. Dies entspricht der warmen Zeit 2011. In allen Szenarien sind die Zusatzkosten bei der Unterflurzuluft am geringsten bzw. dort sind die geringsten Mehrzunahmen nötig. Durchgehend an zweiter Stelle steht das Kühlpad. An letzter Stelle steht die Hochdruckbefeuchtung. Hier muss in dem Negativszenario und einem Schlachtpreis von 1,20 € in Bezug zum Referenzabteil die Tageszunahme um 50 g steigen bzw. gehalten werden. Dies bedeutet, dass die Hochdruckbefeuchtung einen positiven Effekt besitzt, wenn die Tiere im Referenzabteil durch Hitze um 50 g von ihrer normalen Tageszunahme verlieren, im gekühlten Abteil aber nicht. Weiterhin hat sich gezeigt, dass bei sinkendem Schlachtpreis das Plus an Tageszunahme bei der Unterflur mit der Wärmenutzung steigt. Bei der Umrechnung der Kosten (Positivszenario) ist die Unterflurzuluft unter Einbeziehung der Wärmenutzung um 8 g besser (Schlachtpreis: 1,60 €) als das Referenzabteil. Dies steigert sich auf 11 g bei einem Schlachtpreis von 1,20 €.

Wirtschaftlichkeit der Praxisbetriebe

Aufgrund der unregelmäßigen Messergebnisse und vor allem aufgrund der nur ungefähren Bestimmung der Erwärmung der Zuluft sind wichtige wirtschaftliche Grundlagen zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit nicht gegeben. Diese Punkte sind für die Entscheidung der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Systeme grundlegend notwendig. Zur späteren Beurteilung wurde auf Zahlen aus der Literatur zurückgegriffen.

Tab. 41: Szenarioanalysen zu Energie- und Schlachtpreisen. Darstellung der Mehrkosten der Kühlungssysteme bzw. der benötigten höheren TZG zum Mehrkostenausgleich. (Annahme: Mindestens 82 Tage > 22°C)

Schlachtpreis [€ kg ⁻¹]	1,40					1,60					1,20					
	Kühl- pad	HDB	Unter- flur	Unterflur + Wärme- nutzung	Kühl- pad	HDB	Unterflur	Unterflur + Wärme- nutzung	Kühl- pad	HDB	Unter- flur	Unterflur + Wärme- nutzung	Kühl- pad	HDB	Unter- flur	Unterflur + Wärme- nutzung
Kostendifferenz zum Referenz- abteil [€ TP⁻¹]	3,28	4,70	2,18	-1,10	3,28	4,70	2,18	-1,10	3,28	4,70	2,18	-1,10	3,28	4,70	2,18	-1,10
TZN plus [g]	29	41	19	-9	25	36	17	-8	33	48	22	-11	33	48	22	-11
Positivszenario (aktuelle Energiepreise)																
Kostendifferenz zum Referenz- abteil [€ TP⁻¹]	3,6	4,89	1,57	-3,35	3,6	4,89	1,57	-3,35	3,6	4,89	1,57	-3,35	3,6	4,89	1,57	-3,35
TZN plus [g]	31	43	14	-29	27	37	12	-25	37	50	16	-34	37	50	16	-34
Negativszenario																
Kostendifferenz zum Referenz- abteil [€ TP⁻¹]	3,44	4,79	1,88	-2,22	3,44	4,79	1,88	-2,22	3,44	4,79	1,88	-2,22	3,44	4,79	1,88	-2,22
TZN plus [g]	30	42	17	-19	26	37	15	-17	35	49	19	-14	35	49	19	-14
Trendszenario																
Kostendifferenz zum Referenz- abteil [€ TP⁻¹]	3,44	4,79	1,88	-2,22	3,44	4,79	1,88	-2,22	3,44	4,79	1,88	-2,22	3,44	4,79	1,88	-2,22
TZN plus [g]	30	42	17	-19	26	37	15	-17	35	49	19	-14	35	49	19	-14

4.7.2 Diskussion der Energieeffizienz und der Wirtschaftlichkeit

Da die zwei Punkte Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit eng miteinander verknüpft sind, werden beide gemeinsam im folgenden Kapitel bewertet.

Verglichen mit der Literatur (siehe Tab. 42), zeigt sich die gute **Energieeffizienz** aller Ventilatoren an der LSZ Boxberg. Im direkten Vergleich ist aber die Unterflurlüftung bis zu 40 % gegenüber den anderen Abteilventilatoren sparsamer. Nur der Modulstall, der von RÖSMANN (2012) untersucht wurde, weist ähnliche Werte auf. Hauptgrund dafür war in beiden Systemen der geringe Unterdruck in den Abteilen. Dadurch mussten die Ventilatoren gegen einen geringeren Widerstand arbeiten (RÖSMANN, 2012; THREM et al., 2011). Ein Absenken des Energiebedarfs bei den gekühlten Abteilen, wie es HÄUßERMANN (2006); HESSEL & VAN DEN WEGHE (2011); VAN CAENEGEM et al., (2012) beschreiben, konnte durch den Versatz an Einstallterminen nicht ermittelt werden. Der erhöhte Energieverbrauch bei den Lüftern 2012 ist auf die höhere durchschnittliche Sommeraußentemperatur zurückzuführen. Diese lag im Schnitt 2011 bei einer Außentemperatur größer 22°C bei 24,73°C und im Folgejahr bei 25,44°C.

Tab. 42: Vergleich des Energieverbrauchs der Ventilatoren an der LSZ Boxberg zu Literaturangaben.

	Energieverbrauch Lüftung [kWh TP ⁻¹ a ⁻¹]			
	Referenzabteil	Kühlpad	Hochdruckbefeuchtung	Unterflurzuluft
2011	9,5	9,7	11,0	7,0
2012	13,6	12,2	13,9	7,4
Literatur ¹ Standard Stall	16 - 24			
Literatur ² Modulstall	7,5			

¹ Schwankungsbereich der Messmittelwerte: SEIFERT et al. (2009); VAN CAENEGEM & DIDIER (1998); VAN CAENEGEM (2010); KTBL (2012)

² Messungen von RÖSMANN (2012)

Ähnliche Beobachtungen wie Boxberg wurden auch auf den Praxisbetrieben bei den Messungen des Stromverbrauchs gemacht. Dabei zeigte sich, dass der Betrieb A (EWT) zumindest für den Zeitraum, wenn alle Ventilatoren des Stalles auf 100% Lüfterleistung laufen die Lüfrate nach DIN 18910 (2004) für ein voll belegtes Abteil zu gering ist (vgl. Abb. 84 und Kapitel 3.1.2.1). Wie groß der Einfluss ist, wenn einzelnen Abteilen beim Betrieb A (EWT) leer sind und deren Ventilator abgeschaltet ist konnte in dieser Untersuchung nicht beantwortet werden. Auch zeigt sich, dass durch den Erdwärmetauscher mehr Energie

aufgewendet werden muss um eine bestimmte Luftmenge in bzw. aus dem Abteil zu bewegen. Dieses zeigen auch die Untersuchungen von VAN CAENEGEM et al. (2010).

Der Praxisbetriebe B (Unterflur) weist wie das Abteil Unterflurzuluft an der LSZ Boxberg einen sehr geringen Unterdruck auf. Dieser lag auch bei einer Lüftrate von 100% unter dem des Betriebes C (HDB Strahl Lüftung). Dennoch war die geförderte Lüftrate geringer bei Betrieb B (Unterflur) als bei Betrieb C (HDB). Ursache dafür lag an der Platzierung der Messpunkte der Differenzdruckmessung. Die Messpunkte befanden sich in beiden Fällen an der gleichen Position im Stall. Allerdings unterscheiden sich die zwei Betriebe in der Abluftführung. Die Abluftkamine von Betrieb C (HDB) ragten in das Abteil hinein, sodass die Luft keinen zusätzlichen Widerstand auf dem Weg aus dem Abteil hatte. Bei Betrieb B (Unterflur) muss die Luft zunächst in einen Abluftkanal, der zusätzlich zwei 90° Abzweigungen hatte. Des Weiteren war der Abluftkamin von Betrieb B (Unterflur) ca. 3m höher als der des Betriebes C (HDB). Diese Punkte boten einen zusätzlichen Widerstand (BÜSCHER, 1991), der von der Messtechnik nicht erfasst wurde. Unter gleichen Abluftbedingungen dürfte sich der Stromverbrauch je Tierplatz der zwei Praxisbetriebe aneinander angleichen. Aber anhand dieses Beispiels zeigt sich auch, dass die Praxisbetriebe nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden können. Weitere Einflüsse auf den unterschiedlichen Stromverbrauch können zum einen die Modelle der Ventilatoren haben. So sind neuere Modelle in der Regel sparsamer. Zum Anderen ist es von Bedeutung, wie lange ein Ventilator bereits in Betrieb ist und wie er gewartet wurde.

Durch die unterschiedlichen Installationstermine hat sich jedoch gezeigt, dass diese einen erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch eines Abteils ausüben können. Dies wurde im Kapitel 4.6.1 erläutert. So war der Stromverbrauch der Ventilatoren bei kleineren Tieren im Sommer durch die geringe Lüftungsrate niedrig. In der Praxis ist aber meist ein flexibles Einstellen nicht möglich, da ein leer stehender Stall oft mehr kostet, als man durch ein Verschieben des Einstellens an Energie einsparen würde.

Bei den Kühlpad hat sich besonders stark die optimierte Einstellung der Steuerung bemerkbar gemacht. Durch diese wurde über die Hälfte an Strom und über ein Viertel an Wasser eingespart, dabei war die Kühlleistung sogar noch höher als im Jahr zuvor. Eine technische Ursache hierfür war, dass es durch das seitliche Vorbeilaufen des Wassers am Sammelkanal an der Unterseite des Kühlpad zu Verlusten kam. Dies wurde 2012 behoben. Zum anderen war durch die Steuerung eine effektivere Wasseraufnahme der Luft gewährleistet. So kam keine zu feuchte Luft in das Abteil.

Wie auch die Hochdruckbefeuchtung arbeitete das Kühlpad am effektivsten bei trockener, warmer Luft. Unter diesen Umständen konnte die Luft die meiste Feuchtigkeit aufnehmen und kühlte dabei am stärksten ab. Dies lässt zugleich den Folgeschluss zu, dass diese zwei Systeme an Küstenregionen mit hoher relativer Luftfeuchte bzw. in Regionen mit warmen, schwülen Sommern weniger gut geeignet sind.

Die direkte **Kühlleistung bzw. Wärmegewinnung** eines Systems wird in der Literatur nur in eingeschränktem Umfang diskutiert, Grund dafür ist die fehlende Bestimmung des Luftvolumenstroms. Meist steht nur die Temperatur selbst und die Frage, um wie viel Kelvin sich diese verändert hat, im Fokus. In der vorliegenden Arbeit wurde daher auch die Kühlleistung über zwei unterschiedliche Wege berechnet. Dabei wurde gezeigt, dass die Werte der Temperaturmessung bei dem Kühlpad weit von dem theoretischen Kühlwert, der aus dem Wasserverbrauchswert abgeleitet wird, abweichen. Die Werte aus der theoretischen Kühlwertberechnung sind zum Teil doppelt so hoch als die Werte aus der Berechnung der Temperaturmessungen. Bei der Berechnung der Verdunstungsenergie wurde davon ausgegangen, dass das komplette Wasser verdunstet ist. Es wurde bereits beim Wasserverbrauch darauf hingewiesen, dass es hier durch Spritzwasser zu einem Verlust kam. Dies schmälerte die Leistung des Kühlpad ein wenig. Dennoch ergaben sich auch aus den gemessenen Werten und der daraus in Gleichung (5) berechneten Kühlleistung die höchsten Kühlleistungen. Bei der Hochdruckbefeuchtung ist nur eine Berechnung der Verdunstungsenergie möglich. Dabei wird vorausgesetzt, dass das verbrauchte Wasser zu 100% zur Kühlung umgesetzt werden kann. Daraus ergab sich wiederum die gleiche Reihenfolge, die man bei der alleinigen Betrachtung der Temperaturwerte erkennen konnte. Das Kühlpad weist somit die beste Kühlleistung auf, gefolgt von Unterflur und Hochdruckbefeuchtung. Auf dem Praxisbetrieb B (Unterflur) konnte aufgrund der zwei Ansaugpunkte der Zuluft keine genaue Aussage über die Quantität der Kühl- und Heizleistung getroffen werden. Die Auswertung der Stallklimadaten lässt jedoch den Rückschluss zu, dass durch die Zuluftführung gekühlt bzw. erwärmt wurde.

Ein Grundproblem bei der Unterflurzuluft ist häufig, dass sich der Abluftkamin über dem Frischluftgang befindet. In dem Fall muss der Absaugpunkt umgeleitet werden, damit es zu keinem Kurzschluss der Lüftung kommt. Aber auch hier ist die Sommerlüftung mit höheren Luftgeschwindigkeiten zu beachten. Mittels Nebelproben und der Strömungssimulation konnte ein Lüftungskurzschluss ausgeschlossen werden.

Neben der Beantwortung der gegebenen Fragestellungen hat sich zudem gezeigt, wie wichtig eine gute Wärmedämmung ist. So führte der nicht gedämmte Dachraum bei dem

Praxisbetrieb C (HDB) zu einer ungewollt starken Erwärmung der Außenluft, was die Hochdruckbefeuchtung herabzukühlen versuchte. Umgekehrt verlief es beim Unterflurzulftabteil in Boxberg. Dort wurde die Zuluft in den Unterflurzulftkanälen angewärmt. Dies war am Ende dann die Wärmemenge, die über die nach guter fachlicher Praxis gedämmte Südwand über den Winterzeitraum verloren ging. Auch VAN CAENEGEM (2010) beschreibt die Bedeutung von guter Dämmung.

Bei der **Mehrkostenberechnung** hat sich gezeigt, dass das Kühlpad sehr wartungsintensiv ist. Diese Kosten verringern sich bei der höheren Auslastung von Abteilen mit dem Kühlpad. Der Arbeitsaufwand ist jedoch gleichbleibend hoch, unabhängig von der Größe. Dies ist bei der Hochdruckbefeuchtung nicht festzustellen. Hier erhöhen sich die Arbeitskosten mit jedem zusätzlichen Abteil durch den zusätzlichen Düsenwechsel. Es hat sich auch gezeigt, dass eine Entkalkungsanlage bei der Hochdruckbefeuchtung notwendig ist, wobei hier die Wasserqualität ebenfalls von Bedeutung ist. Im Laufe der Untersuchung ergaben sich immer wieder verstopfte Düsen, die in dem Moment kein Wasser versprühten, die Pumpe und damit die Stromkosten jedoch weiterliefen. Ein weiteres Einsparpotential bei dem Kühlpad bildet die Wahl der Pumpe. Hier kann ein effizientes Gerät die Kosten senken. Auch die Platzierung der Wassertanks spielt bei den Kosten und der Kühlleistung eine Rolle. Je kälter das Wasser, desto besser ist die Kühlleistung. Dafür bieten sich Erdtanks an. Allerdings steigen die Stromkosten mit jedem Meter an, den das Wasser hinauf gepumpt werden muss. Hierfür empfiehlt es sich, den Tank gut zu dämmen und den Pumpweg so kurz wie möglich zu halten.

Mittels der **Szenariendarstellung** der Kosten sollten vergleichbare Bewertungen für zukünftige Kosten der einzelnen Systeme errechnet werden. Das Positivszenario wurde mit den aktuellen Energiepreisen gewählt, da auch nach der Trendberechnung nicht von einem Preisrückgang auszugehen ist. In der Analyse wurden längere oder kürzere Warmwetterperioden nicht berücksichtigt. Hierfür wurden nur die gemessenen Daten verwendet. Auch war das Einbeziehen eines Plus oder Minus an Tageszunahme nicht möglich (vgl. Kapitel 4.4.1). So konnten die von VENZLAFF & MÜLLER (2008) gezeigten Leistungsgewinne bei den Mastschweinen nicht bestätigt werden.

Die Annahmen zu Baukosten fallen in dieser Berechnung etwas höher aus als bei VENZLAFF & MÜLLER (2008). Ursache ist hier der etwas größere Zuluftkanal an der LSZ Boxberg. Dennoch ergab sich der gleiche Schluss, dass das System kaum höheren Mehrkosten als ein Standardabteil zu erwarten sind. Hier müssen im schlechtesten Fall mindestens 60% der aus der Unterflur gewonnenen Wärmeenergie genutzt werden, damit keine

Zusatzkosten im Vergleich zum Referenzabteil entstehen. Es hat sich in den Untersuchungen auch gezeigt, dass die Unterflurlüftung bei der Einstellung 100% einen etwas höheren Volumenstrom aufweist. Hier wäre zusätzliches Einsparpotential möglich, indem man die Lüfter der Unterflurzuluft neu einstellt. Durch den geringeren Unterdruck des Lüftungssystems ist es möglich, den Ventilator bei geringerer Leistung zu fahren.

Um eine präzisere Aussage darüber treffen zu können, inwieweit sich die Kühlung auf die Tageszunahme auswirkt und inwieweit sich die Kühlpotentiale voneinander unterscheiden, müsste man den Versuchsaufbau mit gleich alten Tieren wiederholen. Zudem waren die warmen Zeiträume meist zu kurz, um die Kühlungssysteme an ihre Leistungsgrenzen zu bringen. So konnte bei der Unterflurlüftung nicht beobachtet werden, ab wann sich die Kellerräume soweit aufgeheizt haben, dass sie kaum noch eine Abkühlung bieten. Unter einem längeren warmen Zeitraum würde auch der Altersunterschied zwischen den Abteilen dahingehend abnehmen, dass man negative oder auch positive Einflüsse besser erkennen und diese dann entsprechend gewichten könnte.

Standorteinfluss

Wie bereits von ABSHOFF 1974 beschrieben, lässt sich nicht generell eine feste Kühlungsmethode für ein Stallsystem bestimmen. Von grundlegender Bedeutung für den Aspekt der Wirtschaftlichkeit ist die genaue Überprüfung des jeweiligen Standortes. Als Beispiel hierzu soll die unterschiedliche Anzahl an Tagen über 22°C dienen, die laut dem DEUTSCHEN WETTERDIENST (2012) und dem LTZ AUGUSTENBERG (2013) im Jahr 2012 an folgenden Standorten verzeichnet wurden:

Schwerin:	58 Tage
Hannover:	61 Tage
Potsdam:	77 Tage
Freiburg:	100 Tage
Boxberg:	82 Tage

Hier ist ein zu erwartendes Süd-Nordgefälle an warmen Tagen zu erkennen, wodurch sich für alle Standorte eine individuell andere Wirtschaftlichkeitsberechnung ergibt. Hinzu kommen zudem Unterschiede hinsichtlich der Tageshöchstwerte, die sich auf die Wahl des jeweiligen Kühlsystems auswirken. Denn das System muss umso leistungsfähiger sein, je höher die Temperaturen am jeweiligen Standort ausfallen.

4.8 Strömungssimulation

4.8.1 Ergebnisse der Strömungssimulation

In dem folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Strömungssimulation des Referenzabteiles und des Unterflurzuluftabteils präsentiert. Diese unterteilen sich wiederum in die Sommer- und die Wintersituation (vgl. Kap. 3.8).

4.8.1.1 Sommer- und Wintersituation im Referenzabteil

Sommersituation im Referenzabteil

Die Vektordarstellung der Strömungsgeschwindigkeit im Längsschnitt des Abteils (Mitte der Buchten) zeigt eine fein strukturierte und an vielen Stellen sehr langsame Raumströmung (Abb. 85). In der Länge des Abteils befanden sich acht bis neun kleinere Wirbel, die meist von einer Porendecke ausgingen. Die durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit im Tierbereich (in 0,8 m Höhe) betrug $0,13 \text{ m s}^{-1}$ und im gesamten Stallraum durchschnittlich $0,14 \text{ m s}^{-1}$. Die durchschnittliche Temperatur im Tierbereich lag bei $24,5^\circ\text{C}$.

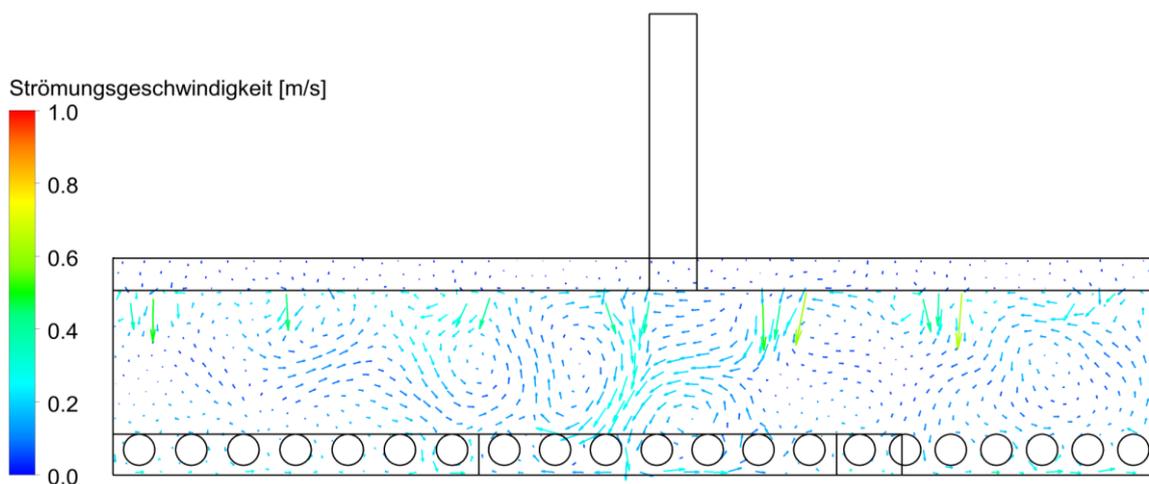


Abb. 85: Strömungsgeschwindigkeit im Längsschnitt (Mitte der Buchten) des Referenzabteils, Sommersituation (Vektoren 15-fach verlängert).

Wintersituation im Referenzabteil

Im Längsschnitt des Abteils sind in der Vektordarstellung drei große Strömungswirbel zu erkennen (Abb. 86). Vor allem in Bucht 3 steigt die Luft über den Tiermodellen auf, während in Bucht 2 eine Abwärtsbewegung zu erkennen ist. Die Strömungsgeschwindigkeit war im Tierbereich und an der Porendecke am höchsten. In diesen Bereichen wurden Werte über $0,2 \text{ m s}^{-1}$ erreicht, während in mittlerer Raumhöhe die Strömungsgeschwindigkeit unter $0,1 \text{ m s}^{-1}$ lag. Die Lufttemperatur lag im Bereich von 7°C bis 12°C , wobei Temperaturen über 10°C nur im Tierbereich auftraten. Besonders war dies im Aufstiegsbereich

des Wirbels über Bucht 3 der Fall, wo die Konvektion über den Tiermodellen sichtbar war (Abb. 87).

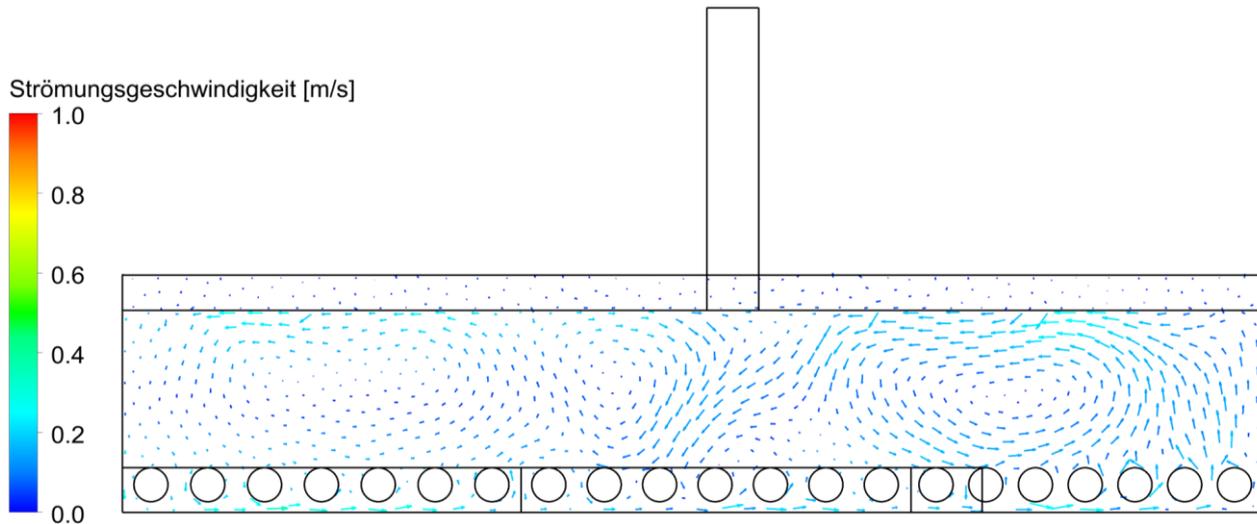


Abb. 86: Strömungsgeschwindigkeit im Längsschnitt (Mitte der Buchten) des Referenzabteils, Wintersituation (Vektoren 15-fach verlängert).

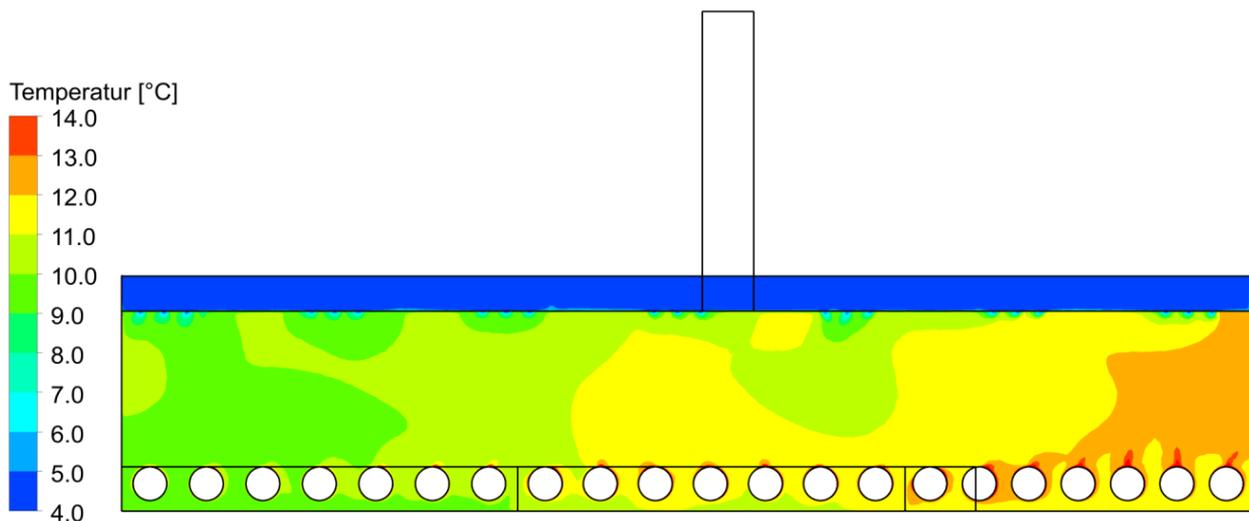


Abb. 87: Lufttemperatur im Längsschnitt (Mitte der Buchten) des Referenzabteils, Wintersituation.

4.8.1.2 Sommer- und Wintersituation im Unterflurzuluftabteil

Sommersituation im Unterflurzuluftabteil

Strömungsgeschwindigkeit und Lufttemperatur im Unterflurzuluftabteil wurden in der Simulation der Sommersituation sehr stark durch die Zuluftströme beeinflusst. Die Luft von beiden Zuluftöffnungen traf sich hierbei hinter dem Abluftkasten (Abb. 88). Die kühlere Luft aus dem Unterflursystem vermischte sich hauptsächlich im hinteren Bereich des Abteils mit der wärmeren Zuluft von außen (Abb. 89). Des Weiteren wurde der vordere Bereich

des Abteils (Bucht 1) sehr viel weniger durchmischt als der hintere. Die Simulation ergab eine Luftgeschwindigkeit von $0,16 \text{ m s}^{-1}$ am Messpunkt des Abteilsensors in Bucht 1. Im Stallraum betrug die durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit $0,23 \text{ m s}^{-1}$, im Tierbereich $0,21 \text{ m s}^{-1}$. Die Eintrittsgeschwindigkeit der Luft in den Unterflurkanal war $2,3 \text{ m s}^{-1}$ an der vorderen Öffnung (Unterflurssystem) und $1,2 \text{ m s}^{-1}$ an der hinteren (außen). Der Mittelwert der Temperatur im Tierbereich lag bei $22,4^\circ\text{C}$. Der vordere Bereich des Abteils wurde durch die Tiere stärker erwärmt. So betrug die Temperatur am Messpunkt des Abteilsensors $22,9^\circ\text{C}$.

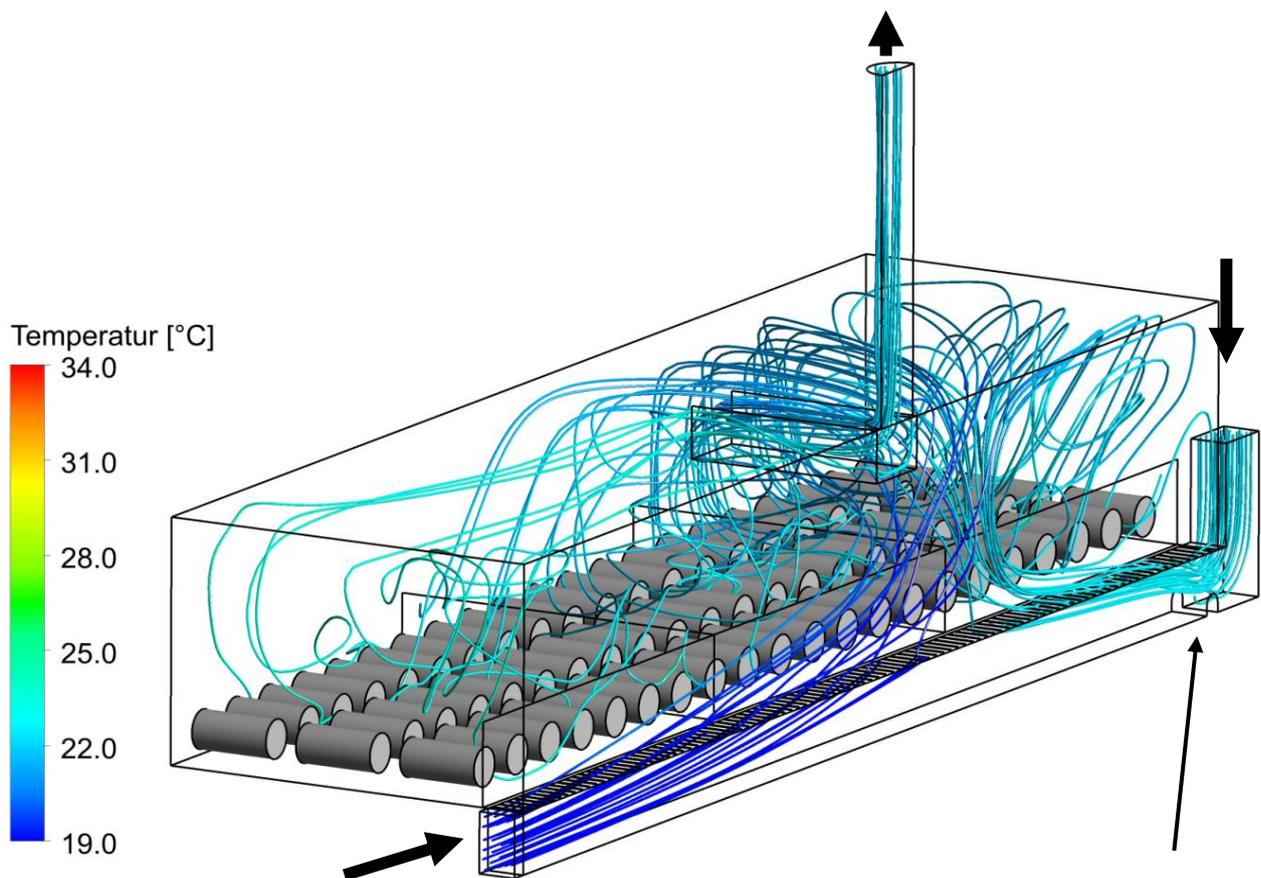


Abb. 88: Stromlinien und Lufttemperatur im Unterflurluftabteil (Modell mit Güllerohr im Unterflurkanal), Sommersituation.

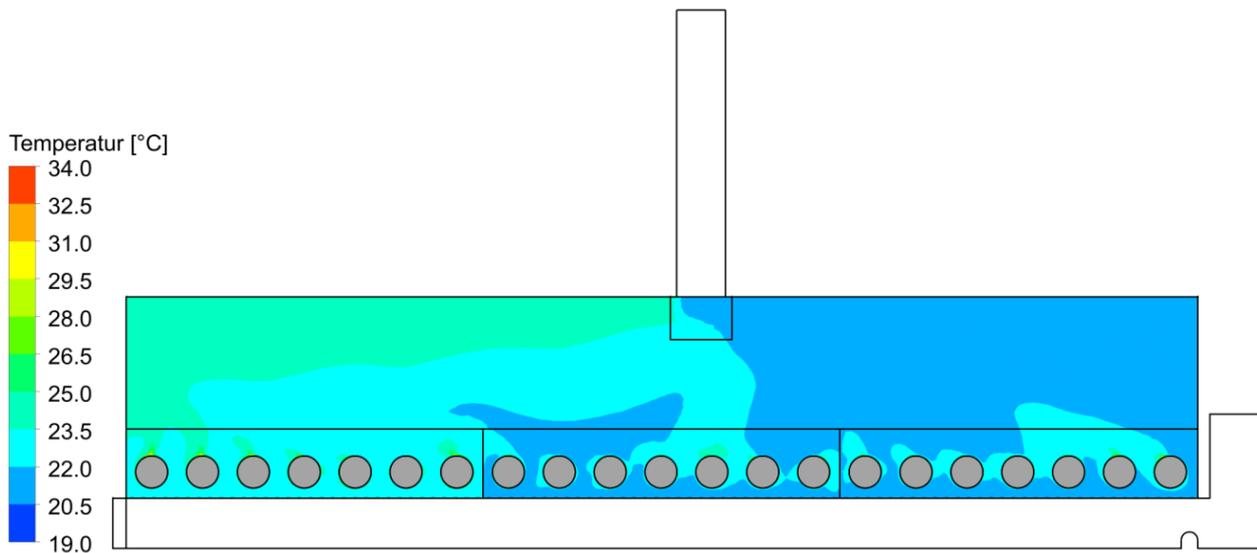


Abb. 89: Lufttemperatur im Längsschnitt (Mitte der Buchten) des Unterflurzuluftabteils (Modell mit Güllerohr im Unterflurkanal), Sommersituation

In einer zusätzlichen Simulation wurde die Sommersituation im Unterflurzuluftabteil mit einem Stallmodell simuliert, in dem das Güllerohr im Unterflurkanal nicht eingesetzt war (Abb. 90) (ADRION et al., 2013). Diese Simulation ergab ein grundlegend anderes Strömungsbild. So verlagerte sich in diesem Fall der Treffpunkt beider Zuluftströme vor den Abluftkasten, was eine bessere Durchlüftung des vorderen Bereiches des Abteils zur Folge hatte. Im Tierbereich lag die durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit bei $0,18 \text{ m s}^{-1}$, die durchschnittliche Temperatur bei $23,0^\circ\text{C}$. Die Eintrittsgeschwindigkeit der Luft in den Unterflurkanal betrug $1,7 \text{ m s}^{-1}$ an der vorderen Öffnung (Unterflurssystem) und $1,8 \text{ m s}^{-1}$ an der hinteren (außen).

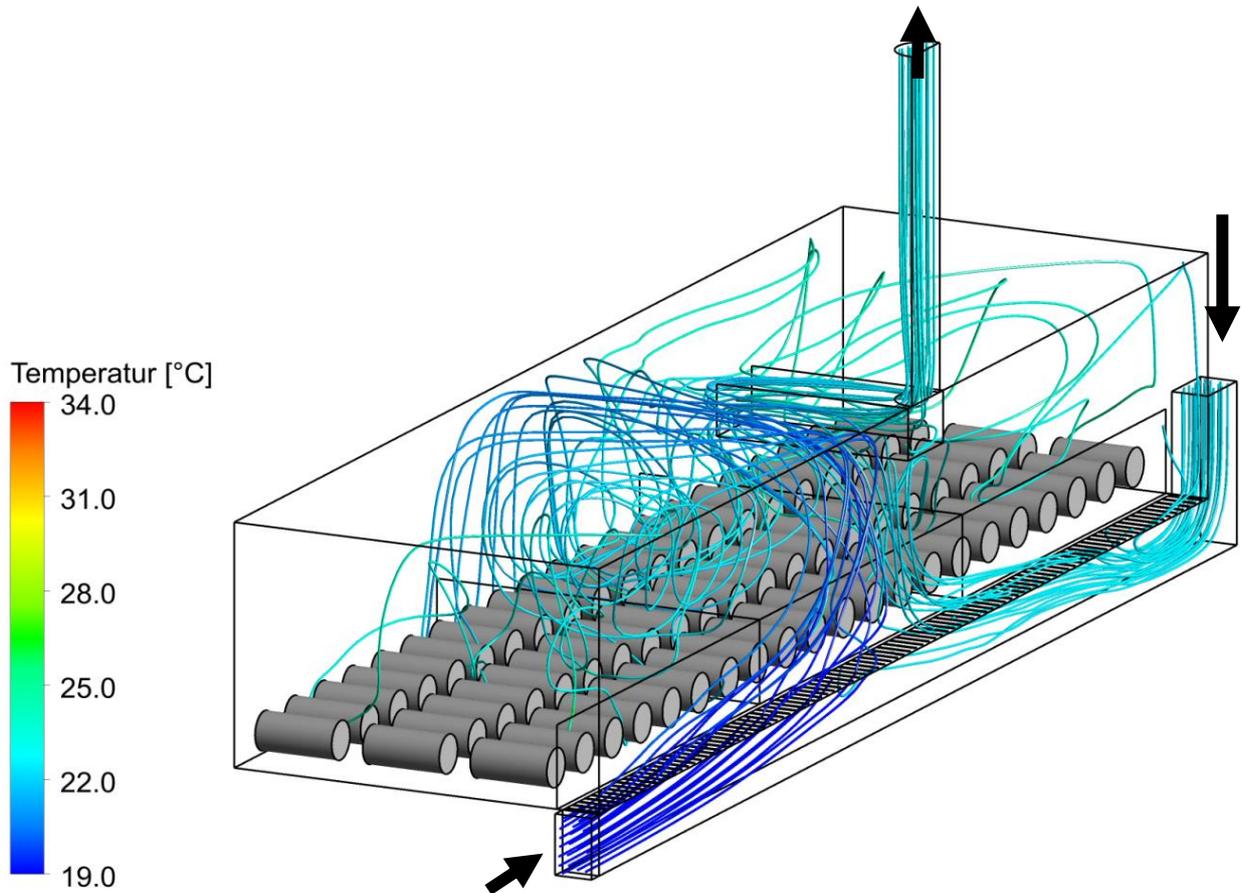


Abb. 90: Stromlinien und Lufttemperatur im Unterflurzuluftabteil (Modell ohne GÜllerrohr im Unterflurkanal), Sommersituation.

Wintersituation im Unterflurzuluftabteil

Im Gegensatz zur Sommersituation wird die Zuluft in der Wintersituation nur aus dem Unterflurkanal angesaugt. Die Simulation der Wintersituation ergab eine sehr niedrige durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit im Tierbereich von $0,05 \text{ m s}^{-1}$. In der Darstellung der Stromlinien in der Vorderansicht des Abteils ist das Strömungsbild dieses Lüftungssystems mit einer Erwärmung der Zuluft beim Aufsteigen im Zentralgang und anschließendem Abfallen in den Tierbereich erkennbar (Abb. 91).

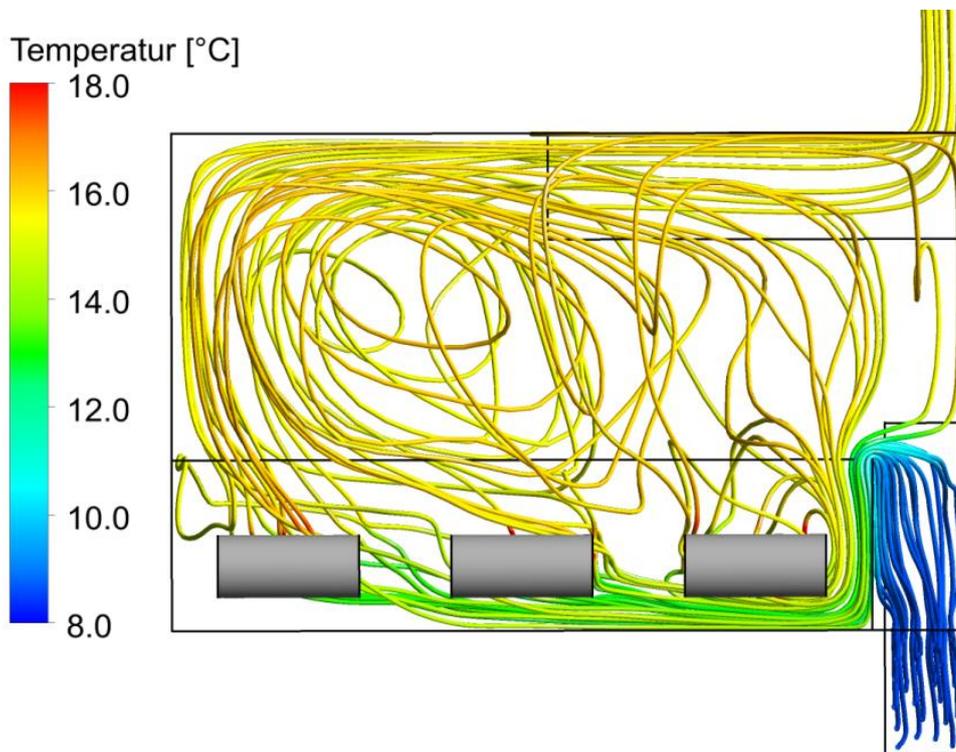


Abb. 91: Stromlinien und Lufttemperatur in der Vorderansicht des Unterflurzuluftabteils (Ansicht von vorne auf Bucht 1), Wintersituation.

4.8.2 Diskussion der Strömungssimulationsergebnisse

4.8.2.1 Referenzabteil

Sommersituation im Referenzabteil

Methodische Untersuchungen mit verschiedenen Modellen der Porendecke ergaben, dass der Einfluss der Zuluftöffnungen auf das Strömungsbild im verwendeten Modell größer war als in der Realität. Eine weitere Verkleinerung der Zuluftöffnungen ist somit anzustreben. Trotz dieser Einschränkungen stimmten die Simulationsergebnisse der Luftgeschwindigkeit im Tierbereich mit den Messdaten sehr gut überein. Am Messpunkt des Abteilsensors (Mitte der ersten Bucht, 80 cm Höhe) wurde die Luftgeschwindigkeit korrekt abgebildet. Für die Lufttemperatur betrug die Differenz zwischen Simulation und Messwert nur -1,8 K.

Wintersituation im Referenzabteil

Die Ergebnisse für die Lufttemperatur in der Wintersituation waren nicht realistisch. Die Temperatur am Abteilsensor wurde von der Simulation um 14,3 K unterschätzt. Auch in den übrigen Simulationen in Sommer- und Wintersituation wurde die Temperatur im Abteil um ca. zwei bis fünf Kelvin unterschätzt. Dies ließ sich auf die Vernachlässigung der von den Tieren abgegebenen Wärmestrahlung zurückführen. Jedoch konnte in methodischen

Untersuchungen mit verschiedenen hohen konvektiven Wärmeflüssen auf der Oberfläche der Tiermodelle festgestellt werden, dass die Beeinflussung des Strömungsbildes und -verlaufes durch die Wärmeabgabe der Tiermodelle gering war.

Ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messdaten des Abteilsensors ergab eine gute Übereinstimmung im Hinblick auf die Strömungsgeschwindigkeit. Die Abweichung zum Messwert betrug $+0,03 \text{ m s}^{-1}$.

4.8.2.2 Unterflurzuluftabteil

Sommersituation im Unterflurzuluftabteil

Ein Vergleich der Simulationsergebnisse für die Strömungsgeschwindigkeit mit den Messdaten am Abteilsensor war nur eingeschränkt möglich, da die Strömungsgeschwindigkeit unterhalb des Messbereichs des Sensors lag. Dies lag vermutlich an der leicht verdeckten Anbringung des Sensors nahe der Trennwand am Trog. Nebelproben zeigten jedoch, dass der Treffpunkt der beiden Zuluftströme auch in der Realität bei hohen Luftraten hinter dem Abluftkasten lag. Somit entstand in der vorderen Bucht, wo der Abteilsensor angebracht war, eine Zone mit geringem Luftwechsel. Dies konnte durch die Simulation bestätigt werden. Die durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit im Tierbereich lag ebenso im Bereich der in ergänzenden Messungen mit einem Thermoanemometer ermittelten Werte. Ein Vergleich der simulierten Lufttemperatur mit dem Messwert am Abteilsensor ergab eine Differenz von $-2,4 \text{ K}$. Insgesamt bildet die Simulation die Strömung im Abteil folglich gut nach.

Die Simulation im Modell ohne Güllerohr im Unterflurkanal zeigt deutlich den großen Einfluss dieses Rohres auf die Strömung im gesamten Abteil. Ohne den Strömungswiderstand des Rohres wäre der Anteil der direkt von außen angesaugten Luft bei mehr als 50% anstatt ca. 33%. Die bessere Verteilung der Luft im Abteil ohne dieses Strömungshindernis hätte jedoch einen Anstieg der Abteilterperatur durch den erhöhten Anteil an ungekühlter Außenluft zur Folge. Dieser betrug im Vergleich zur ersten Simulation $0,6 \text{ K}$.

Wintersituation im Unterflurzuluftabteil

Ein Vergleich der Ergebnisse mit Nebelproben im Abteil verdeutlicht die gute Abbildung des Strömungsverlaufes durch die Simulation (Abb. 92). Ein Schwachpunkt war jedoch wie auch bei den anderen Simulationen die inkorrekte Abbildung der Lufttemperatur. Deren absolute Werte wurden nicht korrekt wiedergegeben ($-5,2 \text{ K}$ Differenz zum Abteilsensor), jedoch wird die Erwärmung der Luft auf dem Weg vom Zuluftkanal über die Buchtenabtrennungen im Zentralgang bis in den Tierbereich korrekt dargestellt. Ein Ver-

gleich der Simulationsergebnisse für die Luftgeschwindigkeit mit den Messdaten des Abteilsensors ist nicht möglich, da die Luftgeschwindigkeit im Abteil im Vergleichszeitraum unterhalb des Messbereichs des Sensors lag.



Abb. 92: Nebelprobe im Unterflurzuluftabteil, Wintersituation

4.8.2.3 Verwertbarkeit der Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass mit Hilfe von numerischen Simulationen ein vertiefter Einblick in die Strömungsvorgänge in Schweineställen erhalten und Optimierungspotenziale dargestellt werden können. Generelle Aussagen über das Strömungsbild der betrachteten Zuluffführungsvarianten sind mit den vorhandenen Mitteln möglich. Für detailliertere Aussagen zu den Strömungsbedingungen an definierten Punkten im Stallraum wäre jedoch eine exakte Validierung der Simulationsergebnisse unbedingt notwendig (ADRION et al., 2013).

Im Hinblick auf die Fragestellung des Projektes ergeben sich verschiedene Verwertungsmöglichkeiten für die Simulationsergebnisse. So ist ein Vergleich der beiden Lüftungssysteme Porendecke und Unterflurzuluft in Bezug auf das Strömungsbild und die Strömungsgeschwindigkeit im Tierbereich möglich. Auch die Erwärmung der Luft vor dem Eintritt in den Tierbereich in der Wintersituation kann für beide Systeme dargestellt werden, jedoch nicht die absoluten Werte der Lufttemperatur.

Im Unterflurzuluftabteil bekräftigt die Simulation in der Sommersituation die Notwendigkeit des zweiten Lufteinlasses zur Verhinderung zu hoher Luftgeschwindigkeiten im Tierbereich. Allerdings wird durch den Einsatz der hinteren Zuluftöffnung bei hohen Volumen-

strömen eine ungleiche Temperaturverteilung im Abteil in Kauf genommen, da an dieser Stelle ungekühlte Außenluft angesaugt wird. Des Weiteren wird die ungünstige Lage des Abluftpunkts in diesem Abteil durch die Simulationen deutlich herausgestellt. Die mittige Lage des Abluftschachtes kann trotz vorhandenem Abluftkasten zu einer direkten Absaugung von Frischluft führen. Ein Einbau von zwei Abluftpunkten an den Außenwänden des Stalles, ähnlich wie in einer klassischen Futterganglüftung, wäre hier günstiger. Des Weiteren wurde in den Simulationen deutlich, dass Strömungshindernisse im Unterflurkanal die Strömung im Abteil stark beeinflussen. In dieser Hinsicht wäre eine Optimierung der Luftströme mit Leitblechen im Unterflurkanal zur besseren Durchlüftung der Außenbereiche des Abteiles anzustreben und müsste mit weiteren Simulationen untersucht werden (ADRION et al., 2013).

Eine Ermittlung der Kühlleistung der Unterflurkanäle wird durch die Strömungssimulationen ermöglicht. Da keine Messung der im Sommer durch die beiden Lufteinlässe strömenden Luftmengen möglich war, wurde der Anteil der durch den äußeren Einlass strömenden Luft mit Hilfe der Simulation auf 33% geschätzt.

5 ABSCHLUSSDISKUSSION

Hauptziel der Arbeit war es, die jeweilige Eignung, Wirksamkeit und Vorzüglichkeit verschiedener Verfahren der Zuluftführung und Kühlung von Schweinemastställen unter Praxisbedingungen an der LSZ Boxberg und auf Praxisbetrieben darzustellen. Es wurden die Stallklimaparameter (Temperatur, relativer Luftfeuchte, Differenzdruck, Gaskonzentrationen), Gasemissionen, die Energie- und Ressourceneffizienz, Aspekte des Tierwohls und der Leistung, Wirtschaftlichkeitsfaktoren und Strömungssimulationen betrachtet und bereits im Einzelnen in Kapitel 4 diskutiert. Im Folgenden wird ergebnisübergreifend das eigene methodische Vorgehen reflektiert. Die Ergebnisse werden abschließend bewertet und es werden Schlussfolgerungen für die praktische Anwendung gezogen. Schließlich werden Fragestellungen für weiterführende Untersuchungen abgeleitet.

5.1 Bewertung der der eigenen Vorgehensweise

Wahl der Stallanlagen

Die Stallanlagen wurden unter zwei Aspekten ausgewählt. Ziel war, unter möglichst gleichen Bedingungen den Unterschied zwischen Lüftungs- und Kühlungssystemen zu ermitteln. Dieser Aspekt konnte an der LSZ Boxberg gut realisiert werden. Durch gezielte Umbauten wurden die Abteile weitestgehend gleich gestaltet. Bauliche Basisteile wie die Anzahl der Außenwände konnten jedoch nicht verändert werden. Hinsichtlich der Fütterung und Bewirtschaftung der Abteile wurden die Untersuchungsabteile gleich versorgt. Nachteilig war das nicht synchrone Einstellen der Tiere, was aufgrund des geschlossenen Systems an der LSZ Boxberg nicht anders möglich war. Durch das geschlossene System wird jedoch zugleich auch verhindert, dass Krankheiten auf die Anlage verschleppt werden und es so zu Ausfällen und zusätzlichen Problemen kommt. Durch die unterschiedlichen Abteilgewichte war nicht immer klar zu definieren, ob ein Einfluss der Kühlung bzw. Lüftung auf die Tiere und das Abteil stattfand. Von Vorteil war die gute technische und personelle Ausstattung der Forschungsstation LSZ Boxberg. Zum einen war hier eine sichere Datenerfassung möglich, zum anderen konnten Synergieeffekte genutzt werden. So konnten beispielsweise die Aufzeichnung und Auswertungen der Mast- und Schlachtdaten sowie weitere protokollierte Stallereignisse übernommen werden. Auch war durch den direkten Kontakt mit dem unterschiedlichen Fachpersonal vor Ort eine ständige Beratung und Diskussion gegeben.

Ein zweiter Ansatz verfolgte das Ziel, die unterschiedlichen Systeme unter Praxisbedingungen zu bewerten. Aus zeitlichen und finanziellen Gründen war die Ausstattung mehre-

rer Betriebe jedoch nicht möglich, sodass ein Betrieb je System mit Messtechnik ausgestattet wurde. Ein betriebsindividueller Einfluss auf das jeweilige System konnte somit nicht verhindert werden. Dennoch war es möglich, Aussagen und Ergebnissen in Bezug auf das Stallklima, die Schadgaskonzentrationen und –emissionen zu treffen. Negativ auf den Arbeitsablauf wirkten sich die großen Entfernungen der Praxisbetriebe zu der LSZ Boxberg bzw. zu der Universität Hohenheim aus. So war eine kontinuierliche Messtechniküberwachung nicht möglich. Eine anfangs angedachte Überwachung der Messungen per Internet konnte wegen fehlender Internetanbindung an den Ställen bzw. unzureichender Mobilnetzabdeckung nicht umgesetzt werden. Um den hygienischen Anforderungen zu genügen, konnte nur jeweils ein Praxisbetrieb pro Tag angefahren werden.

Betrieb A war mit einen klassischen Erdwärmetauscher ausgestattet, wie ihn bereits EPINATJEFF et al. (1997), VENZLAFF & MÜLLER (2008) und VAN CAENEGEM & DIDIER (1998) beschreiben. Dadurch bot er sehr gute Möglichkeiten, die Ergebnisse mit der bestehenden Literatur zu vergleichen. Der Versuchsstall von Betrieb B (Unterflur) wich etwas von den in der Praxis meist gebauten Unterflurzuluftställen ab. Da es sich hier um eine ältere Stallanlage und eine Umbaulösung handelte, waren die Grundvoraussetzungen etwas schlechter. So sind die Unterflurzuluftkanäle bei neuen Ställen länger und die Abteilhöhe höher. Die Wahl dieses Betriebes sollte speziell praxisnahe Bedingungen präsentieren und die Möglichkeiten des Systems auch unter eher ungünstigen baulichen Bedingungen darstellen. Der Betrieb C mit der Hochdruckbefeuchtung war ein klassischer Mastschweinestall. Bei diesem Betrieb war zu Anfang die Lüftungstechnik nicht optimal eingestellt, was sich auf die Untersuchungsergebnisse auswirkte. Aufgrund der Größe des Abteils war es mit nur zwei Messstellen nicht immer möglich, das gesamte Abteilklima abzubilden.

Räumlich nähere Betriebe, die für einen längeren Zeitraum „Fremdpersonal“ auf den Betrieb hätten Untersuchungen durchführen lassen, konnten trotz intensiver Suche nicht gefunden werden. Grund hierfür waren in der Regel Bedenken der Betriebsleiter bezüglich der hygienischen Sicherheit. Ein Praxisbetrieb mit einem Kühlpad für Mastschweine konnte nicht gefunden werden, sodass diese Untersuchungsvariante nur an der LSZ Boxberg eingebaut wurde.

Versuchsplan und –durchführung

Insgesamt wurden der Versuchsplan und dessen Durchführung als sinnvoll erachtet, um die Zielsetzung des Projektes bestmöglich zu erfüllen.

Im Einzelnen muss zwischen der Untersuchung an der LSZ Boxberg und den Praxisbetrieben unterschieden werden. Durch die kontinuierliche Messung an der LSZ Boxberg über zwei Jahre je nach Messsystem stützen sich die Ergebnisse auf eine solide Datenbasis. Speziell die zeitgleiche Erfassung von Klimadaten, Schadgasen und Verbrauchsdaten ließ Rückschlüsse, etwa auf die Schadgasemission und Ressourceneffizienz der einzelnen Systeme, zu. Durch die hohe zeitliche Auflösung waren Tages- und auch Stundeneffekte nachweisbar und konnten entsprechend bewertet werden. Durch die durch nennenswerte Messausfälle bedingten nicht vollständigen Messungen auf den Praxisbetrieben sind deren Ergebnisse nicht ganz so aussagekräftig wie die der LSZ Boxberg. Dennoch konnten auch hier durch eine hohe zeitliche Auflösung die gleichen Effekte wie an der LSZ Boxberg gezeigt werden. Bei allen Betrieben mit Wärmegewinnung durch die Zuluftführung (Unterflurzuluft, Erdwärmetauscher) waren auch die Messungen im Winterzeitraum von Bedeutung, um die Systeme hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit einordnen und bewerten zu können.

Die Messgrößen, Messtechnik sowie räumliche und zeitliche Probenahme dienten grundsätzlich erfolgreich der Beantwortung der einzelnen Fragestellungen. Insbesondere die Messgenauigkeit war in vielen Fällen unerlässlich. Dennoch ergaben sich einige Besonderheiten, die im Folgenden aufgelistet sind:

- Die schnell aufeinander folgende zeitliche Abfrage der Klimadaten führte speziell an der LSZ Boxberg zum Verlust einzelner Daten. Zugleich wurde kein Mehrgewinn an Informationen zwischen einer Zeitabfrage von drei Sekunden und 30 Sekunden festgestellt. Auch die Umstellung auf eine Minute sollte die Aussagekraft nicht verändern. Bei den Zählerstandsabfragen würde auch ein Rhythmus von zehn Minuten immer noch eine klare Aussage erbringen. Hinsichtlich der Schadgasmessungen wäre es für manche Fragestellungen interessant gewesen, ein kleineres Messintervall zu wählen. Zielgröße wäre auch hier ein Intervall von zehn Minuten. Dies hätte jedoch einen zusätzlichen Multigasmonitor vorausgesetzt.
- Bei Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass die zwei eingesetzten Multigasmonitore nicht immer die gleichen Messergebnisse lieferten. Dennoch wurden in Boxberg beide Messgeräte eingesetzt, wenn ein Gerät zur Reparatur eingeschickt werden musste. Es sollten größere Datenlücken im Untersuchungszeitraum vermieden werden. Da jedoch immer nur ein Gerät eingesetzt wurde, war der direkte relative Vergleich der Varianten an der LSZ Boxberg weiterhin möglich. Der Effekt der unterschiedlichen Geräte auf die Höhe der Messwerte im Zeitverlauf konnte nicht

kompensiert werden. Die absolute Höhe der Messwerte ist mit Einschränkungen versehen.

- Der Multigasmonitor zeigt je nach Gas und Filter eine gewisse Querempfindlichkeit zu anderen Gasen oder Wasserdampf (vgl. Tab. 15). Insbesondere die Bestimmung der Gaskonzentration wird von Wasserdampf stark beeinflusst. Weitere Stoffe und Gase wurden bei einer Vergleichsmessung mit einem FTIR Gasanalysator der Firma Ansyco bestimmt. Dennoch konnte von dieser Einmalmessung keine Langzeitprognose auf den gesamten Messzeitraum gestellt werden.
- Die Anzahl und Anordnung der Strömungssensoren im Abteil führten zu keiner repräsentativen Aussage. Wie man anhand einer Strömungssimulation sehen konnte, sind die Luftgeschwindigkeiten sehr unterschiedlich in einem Abteil verteilt. Zugleich war der Messbereich der Sensoren bei sehr niedrigen Luftgeschwindigkeiten nicht genau genug.
- Die Messungen der Differenzdruckwerte unterlagen sehr großen Schwankungen, die durch die Außenluftgeschwindigkeit verursacht wurden. Diese konnten auch durch unterschiedliche technische Maßnahmen nicht gesenkt werden. Durch die hohe Abfragerate der Messwerte konnten bei der Auswertung dennoch ausreichend klare Ergebnisse generiert werden.
- Um eine noch detailliertere Aussage über die räumliche Verteilung der Stallklimaparameter im Abteil treffen zu können, wäre eine Vielzahl zusätzlicher Sensoren in den Abteilen nötig gewesen. Mit Hilfe der Strömungssimulation konnte dies zum Teil ausgeglichen werden.
- Die Messventilatoren konnten erst am Ende des Messzeitraums kalibriert werden, sodass hier eine Drift über den Untersuchungszeitraum nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann.
- Die Einstellungen und der Datenspeicher des Stallklimareglers konnten nicht abgefragt werden. Sie hätte die Auswertungen zu den einzelnen Lüftungssystemen noch zusätzlich ergänzen können.
- Zu einer besseren Beurteilung des Atemverhaltens der Tiere hätten noch die Staubkonzentrationen gemessen werden können. Zusätzlich wäre eine genauere Beobachtung, die sich nur auf die Atmung konzentrierte von Vorteil gewesen.
- Die Schlachtdaten wurden nicht selbst erhoben, sodass unter Umständen je nach Begutachter die Befundergebnisse bzw. deren Einstufungen variieren können.

5.2 Bewertung und Einordnung der Ergebnisse

Am Ende der Ergebniskapitel Stallklima, Schadgasmessung, Produktionsauswertung, Tierwohl, Wirtschaftlichkeit und Strömungssimulation gab es dazu jeweils eine ausführliche Diskussion der Ergebnisse unter Einbeziehung der Literatur. Die wichtigsten Ergebnisse werden im Folgenden zusammenfassend bewertet und eingeordnet.

Stallklima

Im Kap. 4.2.2 wurden bezüglich des Stallklimas die Parameter Temperatur, relative Luftfeuchte, Differenzdruck, Luftvolumenstrom, Temperature humidity index (THI) und Luftgeschwindigkeit diskutiert. Dabei wurde eine generelle positive Wirkung von allen Kühlungssystemen auf das Stallklima festgestellt. Insbesondere auf die Temperatursenkung hatten die Systeme Kühlpad, Unterflurzuluft und Erdwärmetauscher den größten Einfluss. Dies deckt sich auch mit der in Kap. 4.2.2 erwähnten Literatur. Neben der Dimensionierung eines Systems, besonders bei der Unterflurzuluft und dem EWT, wirkte sich auch die Dämmung des Stalles und, je nach Zuluftvariante, die Dämmung des Dachraumes auf das Erwärmen der Zuluft aus. Als besonders guter Indikator für die Bewertung des Raumklimas hat sich der THI erwiesen. Hier konnte gezeigt werden, dass die zwei Befeuchtungskühlungssysteme das Raumklima für die Schweine nicht verschlechtern, wenn eine Abschaltung bei zu hohen relativen Luftfeuchten vorgesehen wird. Speziell die Unterflurzuluft und das Kühlpad erzielten sehr gute Werte. Dabei ist aber auch eine korrekte Einstellung der Kühlungssysteme mit entscheidend für ein optimales Raumklima. Insgesamt ist die Stallklimaregelung Grundlage für eine funktionierende Lüftung. Bei den Unterflurzuluftsystemen darf sich der Absaugpunkt im Abteil nicht über den Mittelgängen (Zuluftbereich) befinden, da es sonst zu einem Lüftungskurzschluss kommen kann. Weiterhin wurde festgestellt, dass es bei dem EWT zu einer Beeinflussung der Abteillüfter untereinander kommen kann. Wie in Kap. 4.2.1.2.2 beschrieben, konnte es bei einer zu geringen Luftrate zu einer Fehlansaugung von Zuluft durch den Abluftkamin kommen, bzw. die Luftrate eines Abteils wurde um ein Vielfaches verringert.

Ob eine Verringerung der Luftrate im Sommer beim Einsatz von Kühlungssystemen möglich ist, konnte in dieser Untersuchung nicht geklärt werden. Der Differenzdruck wird im Kapitel der Energieeffizienz genauer besprochen, wie auch die Luftgeschwindigkeit im Teil Strömungssimulation.

Schadgasmessung

Einen Überblick der Schadgas- und Emissionswerte geben Tab. 31 und Tab. 32 und lassen eine Einordnung in die Literatur zu. Für die Schadgaskonzentration (CO_2 , NH_3 , CH_4) haben sich auch wie in den genannten Literaturbeispielen die Tieraktivität und die Lüftungsrate von Sommer und Winter widerspiegelt. Insgesamt wurde bezüglich der Gaskonzentrationen im Tierbereich kein Unterschied zwischen den Kühlungsvarianten und dem Referenzabteil an der LSZ Boxberg festgestellt. Dabei musste man die ermittelten Messwerte im oberen Bereich der Literaturwerte einordnen. Auffallend waren die Werte der CH_4 -Messungen. Diese lagen um ein Vielfaches über den in der Literatur beschriebenen Werten. Nur bei RATHMER (2002) wurden ähnliche Werte kurzzeitig gemessen. Die genaue Ursache konnte nicht geklärt werden. Weiterhin hat sich gezeigt, dass eine CO_2 -gesteuerte Lüftung wie bei VAN CAENEGEM et al. (2010) hier nicht sinnvoll zur Lüftungsregelung nutzbar gewesen wäre, da die CO_2 -Werte als einzige immer in einem sehr guten Bereich lagen. Die Praxisbetriebe hatten zum Teil geringere Schadgaskonzentrationen. Da aber, wie zuvor beschrieben, eine Vielzahl an Einflussfaktoren auf die Entstehung von Schadgasen einwirkt, ist hier nicht sicher zu sagen, ob die besseren Konzentrationswerte eine Folge der Kühlung oder der weiteren multifaktoriellen Betriebseinflüsse waren.

Bei den Schadgasemissionen sind die Werte der Untersuchungen im Vergleich mit der Literatur eher niedrig, mit Ausnahme der CH_4 -Ergebnissen an der LSZ Boxberg. Weiterhin ist an der LSZ Boxberg ein klarer Unterschied zwischen den Lüftungs- bzw. Kühlungsvarianten zu sehen. So liegen die Emissionswerte des Referenzabteils über denen der anderen gekühlten Abteile. Zwischen den gekühlten Abteilen war aber keine weitere belastbare Abgrenzung des Emissionsgeschehens möglich. Die Werte des Praxisbetriebs (EWT) sind vermutlich vor allem wegen der geringeren Lüfrate niedriger. Zugleich liegen aber die Konzentrationswerte auf diesen Betrieb in einem guten Bereich, sodass man nicht direkt von einer schlechten bzw. für die Tiere schädlichen Luftqualität sprechen kann.

Produktionsauswertung und Tierwohl

In Kap. 4.4.2 wurden die Produktionsdaten mit den Ergebnissen aus der Literatur verglichen. Dabei zeigte sich, dass es keine einheitliche Aussage über die Effekte der Kühlungssysteme auf die Tageszunahme gibt. In dieser Untersuchung wurden auch keine direkten Effekte auf die Produktionsdaten festgestellt. Dies könnte aber auch an den kurzen heißen Zeiträumen liegen. So sind länger anhaltende hohe Außentemperaturen notwendig, um einen Effekt anhand der Tageszunahme zu sehen. Das Ziel im Sommer ist es

nicht, mittels der Kühlungssysteme die Tageszunahme zu steigern, sondern eher ein Einbruch in den täglichen Zunahmen zu verhindern. Gleichzeitig gibt es, wie auch bei den Schadgaskonzentrationen, eine Vielzahl an Einflussfaktoren (vgl. Kap. 4.4.2), die sich auf die Tageszunahme und deren Kompensationsmöglichkeiten auswirken. Auch Unterschiede bezüglich der Schlachtdaten oder Verluste konnten zwischen den Systemen nicht festgestellt werden.

Zur Bewertung des Tierwohlbefindens wurden an mehreren Terminen die Tiere in den jeweiligen Abteilen beobachtet. Besonderes Augenmerk wurde auf die Atmung und die Buchtenverschmutzung gelegt, da anhand der Literaturangaben (vgl. Kap. 4.5.2) diese Punkte als guter Indikator zur Bewertung von Hitzestress dienen sollten. Allerdings wurde im Bezug zur Buchtenverschmutzung nur der Einfluss des Tiergewichtes festgestellt. So nahm die Verschmutzung bis zu einem Tiergewicht von 80 kg immer mehr zu und ab dann wieder etwas ab. Auch weitere Verschmutzungsgrade waren beispielhaft an dem Praxisbetrieb A (EWT) baulich bedingt. Hier war es den Tieren nicht möglich, einen eindeutig getrennten Liege- und Kotbereich anzulegen. Ein weiterer Punkt, warum es zu keinem klaren Ergebnis kam, waren die schon erwähnten geringen bzw. zu kurzen heißen Zeiträume und die unterschiedlichen Tiergewichte zwischen den Abteilen. Dies zeigte sich so auch wieder bei der Auswertung des Atmungsverhaltens.

Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit

Durch die enge Verknüpfung der Wirtschaftlichkeit mit der Energieeffizienz wurden diese zusammen unter Kap. 4.7.2 diskutiert. Hierbei hat sich die Bedeutung des Differenzdruckes auf den Stromverbrauch der Lüfter gezeigt. So wurde bei den Systemen Unterflurlüftung und Strahl Lüftung am Praxisbetrieb C (HDB) die geringste Energie zum Lüften benötigt. Neben dem geringeren Energieverbrauch ist auch bei der Unterflurlüftung die geförderte Luftmenge höher gewesen als bei den Vergleichsabteilen an der LSZ Boxberg. Durch den hohen Widerstand für die Zuluft ist der Verbrauch beim Erdwärmetauscher sehr hoch bezogen auf die geförderte Luftmenge.

Ein weitere Verbrauchsgröße sind neben den Ventilatoren die Pumpen der HDB und des Kühlpads. Diese benötigen Strom und zur Kühlung Wasser. Hier ist der absolute Verbrauch von Strom und Wasser beim Kühlpad höher. Wenn man es aber auf die Kühlleistung bezieht, so ist das Kühlpad wesentlich effektiver und aus dieser Sicht sparsamer. Hier sind natürlich durch Nutzung sparsamerer Pumpsysteme und Verringerung von Pumpwegen weitere Energieeinsparungen möglich.

Die Systeme Unterflur und EWT konnten die Abteilterperatur insbesondere in der Übergangszeit zwischen Winter und Sommer homogenisieren und die hohen Amplituden der Außenlufttemperaturen dämpfen. Zusätzlich war im Winter eine Erwärmung der Zuluft möglich, was auch wirtschaftliche Vorteile hat.

Als recht großer Einflussfaktor auf die Energieeffizienz haben sich die Einstalltermine selbst herausgestellt, die jedoch praktisch kaum beeinflussbar sind, wenn man längere Leerstandszeiten vermeiden will. So wurde beispielsweise beim Einstellen an warmen Tagen zum einen keine Energie zum Aufheizen der Ställe benötigt und zum anderen waren relativ geringe Luftraten nötig. In der kalten Zeit waren Abteile mit Endmasttieren im Vorteil, da diese eine geringere Abteilterperatur benötigten und so auch weniger zugeheizt werden musste.

Bezogen auf die Kühlleistung ergab sich so ein klares Ranking. Die größte Kühlleistung wies das Kühlpad auf, gefolgt von der Unterflurzuluft und der HDB. Hier steht die Unterflurlüftung vor der HDB, da die rechnerischen Ergebnisse aus Kap.4.6.4 von einer Wasserverdunstung von 100% ausgingen, was praktisch nicht der Fall war. Der EWT würde sich laut Literatur zwischen Kühlpad und Unterflurzuluft einordnen. Die ermittelten Werte vom EWT-Praxisbetrieb (A) sind durch die geringe Luftrate nicht repräsentativ und können so nicht direkt mit den Ergebnissen von der LSZ Boxberg verglichen werden. Bei den wasserbasierten Kühlungssystemen ist zu beachten, dass die Kühlleistung mit steigender relativer Luftfeuchte der Außenluft abnimmt, da die Luft dann weniger zusätzliches Wasser aufnehmen kann, welches zur adiabatischen Kühlung nutzbar wäre.

Bei den Mehrkosten, die die Kühlungssysteme mit sich bringen, ist bei den Systemen Unterflurlüftung und EWT eine Unterteilung möglich, da bei diesen eine zusätzliche Wärmegewinnung möglich ist. Diese Einsparung an Heizkosten und der geringere Stromverbrauch der Lüftung bei dem Unterflurzuluftsystem zeigen, dass die Unterflurzuluft das günstigste der untersuchten Systeme ist. Dabei können die Kosten sogar unter die des Referenzabteils ohne Kühlung sinken. Aber auch ohne den Zusatzgewinn der Wärme ist die Unterflurzuluft sehr gut. An zweiter Stelle steht das Kühlpad, das trotz des hohen Wasserverbrauchs günstiger als die HDB ist. Der Erdwärmetauscher ist, wie bereits 1998 von VAN CAENEGEM & DIDIER (1998) beschrieben, aufgrund der hohen Baukosten das teuerste System.

Strömungssimulation

Die Untersuchungen zur Strömungssimulation bezogen sich wie in Kap. 4.8 ausführlich beschrieben auf die Zuluftführung mit Porendecke (Oberflur) und Unterflurzuluft über den Servicegang. Die Simulation für die Porendecke stimmte mit den gemessenen und in Einzeluntersuchungen festgestellten Luftgeschwindigkeitswerten und Luftbewegungsrichtung überein, trotz des vereinfachten Modells der Porendecke (vgl. Kap. 4.8.2.1). Nur die Temperaturverteilung wich von den gemessenen Werten ab. Ursache hierfür dürfte die nicht miteinbezogene Strahlungswärme der Tiere sein. Gleiches zeigte sich auch bei der Simulation der Unterflurzuluft.

Die Simulationsergebnisse passten auch mit den qualitativen Ergebnissen, die aus mehreren Nebelproben im Stall gewonnen wurden, überein. Besonders gut konnte der Strömungswiderstand eines im Zuluftkanal befindlichen Rohres ermittelt werden (vgl. Kap. 4.8.2.2). Anhand dieser Ergebnisse wurden auch der Anteil der Luftvolumenstrommengen bei zweiseitiger Zulufteinspeisung im Sommer berechnet. Auch das Funktionsprinzip der Unterflurzuluft im Winter wurde von der Strömungssimulation beispielhaft in Abb. 91 realistisch wiedergegeben. Mittels der gewonnenen Ergebnisse aus den Simulationen und den Messungen können im nächsten Schritt weitere Optimierungen hinsichtlich der Zuluftverteilung im Abteil am Computer getestet und bei Erfolg im Stall umgesetzt werden.

5.3 Schlussfolgerungen für die praktische Anwendung

In der folgenden Tabelle sind die Vor- und Nachteile der jeweiligen Kühlungssysteme zusammengefasst. Dabei wurden nur die in der Untersuchung gemessenen Ergebnisse einbezogen. Zusätzlich eine Empfehlung gegeben, bei welchen klimatischen Bedingungen der Einsatz der jeweilige Systeme mehr oder weniger vorteilhaft wäre.

Tab. 43: Zusammenfassung der Nutzbarkeit (pro / contra) und Standortempfehlung

Pro	Contra
Kühlpad	
<ul style="list-style-type: none"> + hohe Kühlleistung + günstig in der Anschaffung + nachrüstbar (Altgebäude) + verschleißarm + geringe Kosten je Kilowatt-Kühlleistung 	<ul style="list-style-type: none"> - Kühlleistung von Außenluftfeuchte abhängig - wartungsintensiv - Fehlermöglichkeiten bei Einstellung bzw. Ansteuerung - zusätzlich benötigter Platz für Kühlpad + Tanks - Wasser und Stromverbrauch (Pumpe)
<ul style="list-style-type: none"> + gut in heißen, trockenen Gebieten + lange Hitzeperioden 	<ul style="list-style-type: none"> - ungeeignet für Standorte mit hoher relativer Luftfeuchtigkeit
Hochdruckbefeuchtung (HDB)	
<ul style="list-style-type: none"> + kühlt und senkt Tageshöchsttemperatur + gut nachrüstbar + Zu- und Abschalten von Abteilen möglich + Luftbefeuchtung jederzeit möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - kann zu vermehrter Buchtenverschmutzung führen - hoher Anschaffungspreis - hoher Energieverbrauch - eingeschränkte Kühlleistung (bei Installation im Abteil) - störanfällig (verstopfte Düsen) - Wasser- und Stromverbrauch (Pumpe)
<ul style="list-style-type: none"> + gut in heißen, trockenen Gebieten + lange Hitzeperioden + Vorteile bei Einbau im Zuluftweg statt im Tierbereich (bessere Wasseraufnahme der Luft) 	<ul style="list-style-type: none"> - ungeeignet für Standorte mit hoher relativer Luftfeuchtigkeit
Unterflurzuluft	
<ul style="list-style-type: none"> + gute Kühlleistung + gute Heizleistung + hohe Energieeinsparung (Lüfter + Heizung) + keine Wartung + gutes Puffern der Zulufttemperaturschwankung + Reinigung der Zuluftkanäle möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Rückgang der Kühl-/ Wärmeleistung bei sehr langen warmen/kalten Perioden - geringe relative Luftfeuchte - besondere Anforderungen an Zuluftweg für Sommerluftverteilung im Abteil
<ul style="list-style-type: none"> + für alle Klimaregionen Deutschlands geeignet 	

Erdwärmetauscher (EWT)

<ul style="list-style-type: none"> + gute Kühlleistung + gute Heizleistung + Einsparung bei Heizkosten + keine Wartung + gutes Puffern der Zulufttemperaturamplitude 	<ul style="list-style-type: none"> - Rückgang der der Kühl-/ Wärmeleistung bei langen warmen/kalten Perioden - hoher Luftwiderstand der Zuluft - Fehllüftung im Sommer möglich (→ geringer Luftvolumenstrom) - höherer Stromverbrauch der Ventilatoren - hohe Baukosten
<ul style="list-style-type: none"> + für alle Klimaregionen Deutschlands geeignet 	

5.4 Weiterführende Fragestellungen

An Hand der ermittelten Ergebnisse ergeben sich neue Fragestellungen, die in weiterführenden Untersuchungen und zur Optimierung der Kühlmöglichkeiten geklärt werden könnten:

- Ist eine zusätzliche Stromeinsparung bei der Unterflurlüftung mit einer an den Volumenstrom angepassten Lüftung möglich?
- Welchen Nutzen würde eine zusätzliche installierte Hoch- oder Niederdruckbefeuchtung in den Unterflurzuluftkanälen bringen?
- Wie lässt sich der Energieverbrauch des Kühlpads reduzieren? (Evtl. durch Optimierung der Pumpen bzw. der Position der Wassertanks)
- Wie groß ist der Unterschied der Luftansaugung im Norden oder Süden bzw. welcher zusätzliche Kühlungsgewinn ist dadurch möglich?
- Welchen Einfluss hat eine Beschattung des Kühlpads auf den Wasserverbrauch und die Kühlleistung?
- Welcher Unterschied besteht zwischen „kalten“ (5°C – 10°C) und „warmen“ (20°C – 25°C) Wasser beim Betreiben des Kühlpads? Ist es ökonomisch sinnvoll, das Wasser kühl zu lagern?
- Wie stark ist der Einfluss von maritimem Klima auf die Unterflurzuluft, und ist der wirtschaftliche Nutzen dann noch identisch zu dem in dieser Arbeit festgestellten Nutzen?
- Welche Möglichkeiten gibt es, die Luftverteilung im Sommer bei der Unterflurzuluft gleichmäßig zu verteilen, ohne dabei den Luftwiderstand maßgeblich zu erhöhen?

-
- Inwieweit sich einen lange Hitze- bzw. Kälteperiode auf die Pufferkapazität der Unterflurzuluft auswirkt? Inwiefern ist der Nutzen von Erwärmung oder Abkühlung der Luft dann noch gegeben?
 - Ist das Installieren mehrerer Sensoren bei der Unterflurzuluft sinnvoll, um z.B. im Winter besser zu erkennen, um wie viel sich die Zuluft erwärmt und an welcher Stelle noch zugeheizt werden muss?
 - Kann man den Wärmegewinn der Unterflurzuluft durch andere Oberflächengestaltung noch steigern bzw. ließe sich durch bessere Luftführung der Stromverbrauch weiter senken?
 - In wie weit sind Optimierungsansätze in der CFD Simulation zur Verbesserung der Luftverteilung im Abteil auf die Praxis übertragbar?
 - Ist eine Lüftungsregelung in Abhängigkeit des Temperature Humidity Index (THI) sinnvoll?

6 ZUSAMMENFASSUNG

Die landwirtschaftliche Nutztierhaltung, insbesondere auch die Schweinemast, steht immer wieder im Fokus der Öffentlichkeit. Diskussionsthemen sind sowohl die Haltungsverfahren, die Umweltwirkung als auch die Stallklimabedingungen im Tierbereich. Der Tierhalter ist dazu verpflichtet, die Temperaturbedingungen und Schadgaskonzentrationen im Tierbereich tiergerecht zu gestalten. Insbesondere im Sommer werden zusätzliche Maßnahmen mit Hilfe der Zuluftführung und technischer Kühlungseinrichtungen erforderlich, um eine Wärmebelastung der Tiere zu verhindern. Neben der Kühlwirkung und Stallklimaparameter sind für den Tierhalter aber auch die Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit verschiedener Kühlmöglichkeiten von Interesse. Diesbezüglich liegen zwar für manche Kühlungssysteme Untersuchungsergebnisse vor. Diese wurden jedoch meist an unterschiedlichen Standorten in Einzelerhebungen durchgeführt, sodass eine direkte Vergleichbarkeit der Verfahren nicht gegeben ist.

Ziel dieser Arbeit war es daher, eine vergleichende Untersuchung von unterschiedlichen Zuluftführungs- und Kühlungssystemen in Schweinemastställen in Hinblick auf die Energieeffizienz, das Emissionsgeschehen, das Tierwohlbefinden und die Wirtschaftlichkeit durchzuführen.

Die Hauptuntersuchung der Systeme Hochdruckbefeuchtung, Kühlpad, Unterflurzuluft sowie eines Referenzabteils ohne Kühlung fand am Bildungs- und Wissenszentrum Boxberg für Schweinehaltung, Schweinezucht (Landesanstalt für Schweinezucht - LSZ) statt. Zum Startzeitpunkt der Messungen unterschieden sich die vier Abteile nur in der Zuluftvariante (3x Porendecke, 1x Unterflurzuluft durch Versorgungsgang) und der Anzahl der Außenwände. Zusätzlich war baulich bedingt das Platzangebot für die Tiere in der Unterflurvariante etwas geringer. Es wurden in sechs Mastdurchgängen jeweils 125 Tiere pro Abteil eingestallt. Dabei war der Einstalltermin von Abteil zu Abteil um drei Wochen versetzt. Des Weiteren wurden noch drei Praxisbetriebe mit den Systemen Erdwärmetauscher, Hochdruckbefeuchtung und Unterflurzuluft untersucht.

Die Stallklimamessungen zeigten bei allen Kühlungsvarianten einen positiven Effekt auf die Abteillinnentemperatur an heißen Tagen. Die größte Kühlleistung erbrachte das Kühlpad, gefolgt von Unterflurzulufführung und Erdwärmetauscher. Die geringste Kühlleistung erbrachte die Hochdruckbefeuchtung. Alle Systeme sind allerdings in diesem Punkt von ihrer Dimensionierung abhängig. Die relative Luftfeuchte in den Abteilen ist erwartungsgemäß bei den auf Befeuchungskühlung basierenden Systemen höher als bei dem Erdwärmetauscher oder der Unterflurzulufführung. Bei richtiger Einstellung übersteigt die re-

relative Luftfeuchte im Abteil jedoch nicht 80%. Aussagekräftiger ist der Temperature Humidity Index (THI). Bei diesem wird die Auswirkung der Kombination von Temperatur und Feuchte auf das Schwein berücksichtigt. Dabei schneidet das Referenzabteil ohne Kühlung immer schlechter ab als die Abteile mit Kühlung. Von den Kühlungsvarianten weisen Unterflurzuluft, Erdwärmetauscher und Kühlpad über die zwei Jahre Untersuchungszeitraum hinweg die besten Kühlleistungen auf. Beim Kühlpad zeigt sich dabei die hohe Kühlleistung von Vorteil, denn durch das starke Absenken der Temperatur wird die höhere relative Luftfeuchtigkeit kompensiert. Von Vorteil bei Erdwärmetauscher und Unterflurzuluftführung ist das Senken der hohen Amplituden der Zulufttemperatur.

Eine Abhängigkeit der Schadgaskonzentrationen im Tierbereich von der jeweiligen Zuluftführungs- und Kühlungsmöglichkeit konnte nicht nachgewiesen werden. Die Werte der Unterflurzuluft waren bezüglich Ammoniak (NH₃) und Methan (CH₄) zwar oft etwas geringer als bei den anderen Abteilen, was auch auf die vergleichsweise höheren Luftraten im Winter zurückzuführen sein könnte. Der Praxisbetrieb mit der Unterflurzuluft zeigte ebenfalls geringe Schadgaswerte. Eindeutiger waren die Ergebnisse zur Schadgasemission. Hier waren die Vorteile der Kühlungsvarianten gegenüber dem nicht gekühlten Referenzabteil zu sehen.

Hinsichtlich der Ressourceneffizienz war das Unterflurzuluftsystem klar im Vorteil. Bei diesem wurde durch den geringen Unterdruck im Abteil der geringste Stromverbrauch für den Abluftventilator gemessen, zudem wurden zum Kühlen keine zusätzlichen Ressourcen benötigt. Weiterhin war auch eine Wärmegewinnung an kälteren Tagen möglich. Der Erdwärmetauscher zeigte die gleichen Vorteile, nur war der Luftwiderstand höher, wodurch ein höherer Stromverbrauch für den gleichen Luftvolumenstrom nötig war.

Das Tierverhalten als auch die Gesundheits- und Leistungsparameter sind multifaktoriell beeinflusst und weisen eine hohe Varianz auf. Deshalb war eine eindeutige Rückführung der Ergebnisse der Tierbeobachtung, der Schlachtbefunde und Tageszunahmen bzw. der Futtermittelverwertung auf die jeweilige Zuluftführungs- und Kühlungsvariante nicht möglich. Des Weiteren gab es in den Beobachtungszeiträumen keine länger andauernden Hitzeperioden, die bei den Tieren des Referenzabteils nachweislich Hitzestress verursacht hätten.

Bei der Kostenbetrachtung erwies sich die Unterflurzuluft als vorteilhaft. Hier konnten je nach Ansatz für den zusätzlichen Wärmegewinnungseffekt sogar die baulichen Mehrkosten gegenüber dem Referenzabteil gedeckt werden und weitere Energiekosten eingespart werden. Das teuerste System war die Hochdruckbefeuchtung. Nicht zuletzt hinsichtlich der

Funktionssicherheit war dieses am stör anfälligsten und wartungsintensivsten durch verstopfte Düsen.

Insgesamt zeigte die Unterflurzuluft die meisten Vorteile. Dieses System eignet sich jedoch nur für Neubauten, während als Nachrüstungsvariante eines Kühlungssystems das Kühlpad die besten Ergebnisse erzielte.

7 SUMMARY

The keeping of farm animals, especially of pigs, is often in the public spotlight. A particular focus is on the housing conditions for fattening pigs and related noxious gas emissions, since one of the major problems is maintaining a good stable climate in summer. The solution to this problem can only be found in air cooling systems. Aside this, farmers not only concentrate on animal welfare, but on cost-effectiveness and efficiency. Considering this, there are results available for some cooling systems. However, most of the investigations on such systems have been carried out at different locations and therefore inhibit a direct comparison of the systems.

With this in mind, this paper will compare different air supply and cooling systems in pig fattening houses using the parameters energy consumption, concentration and emission of noxious gases, animal welfare, and cost-effectiveness.

The main systems studied were the high pressure humidifier, cooling pad, underfloor air inlet and supply, and the reference compartment (without cooling); this research was carried out on the university farm Landesanstalt für Schweinezucht (LSZ) Boxberg. At the beginning of the experiments, the four compartments differed only in the way in which the air was channelled into the compartments (porous ceiling (3 times), underfloor air inlet through the central control passage (once)), and in the number of their outer walls. Furthermore, there was less space for the animals housed in the compartment with the underfloor air inlet system due to structural conditions. One compartment held 125 animals per fattening period, and there were six fattening periods in total. Every three weeks, 125 new animals were put into one of the four compartments. The earth tube heat exchanger, the high pressure humidifier and the underfloor air inlet were examined under practical conditions on three working farms.

On hot days, the air cooling systems studied improved the indoor temperature of the compartments. The cooling pad was the system with the best cooling effect, followed by the underfloor air inlet and the earth tube heat exchanger. The high pressure humidifier offered the least cooling effect. However, the effectiveness of each of the systems is dependent on their dimensions. As expected, the relative humidity in compartments with systems based on humidification is higher than in those using the earth tube heat exchanger or the underfloor air inlet. If the system is set correctly, the relative humidity is not higher than 80%. The temperature humidity index (THI) is more informative here. The THI considers the effects of the combination of temperature and humidity on the pigs. In this regard, the reference compartment without cooling performs poorly compared to the other

compartments working with air cooling systems. Looking at the data gained in the two years of the study, it becomes apparent that the underfloor air inlet, the earth tube heat exchanger and the cooling pad demonstrate the biggest cooling effect. The significant effect of the cooling pad turned out to be advantageous with regard to the high relative humidity, since the humidity is lowered through the decreasing temperature. The earth tube heat exchanger and the underfloor air inlet help to reduce the high temperature amplitudes of the incoming air, which can be considered the major advantage of these two systems.

No detailed statement can be made concerning the concentration of noxious gas emissions. However, the data for the emission of ammonia and methane in the underfloor air inlet system was better than the data measured from the other three systems; one explanation for this might be the high volume air flow in winter. The concentration of noxious gases measured on the practical farm using underfloor air inlet was also relatively low. Aside from these findings, the fluctuations observed throughout the two years of the study are too high and the differences of the measurements are too low, respectively, to draw any further significant conclusions.

However, interesting findings could be made concerning the emission of noxious gases. As could be observed in the LSZ, the cooling systems, which hardly display any significant differences concerning the reductions of gas emissions, all display advantages compared to the reference compartment without cooling.

Looking at the efficiency of the systems, the underfloor air inlet turned out to be the most economical system. Due to the underpressure in this compartment, the system's energy consumption for the exhaust fan is relatively low, and no additional resources were needed for the cooling process. Furthermore, heat could be generated on cold days. These advantages can be found with the earth tube heat exchanger as well, but its energy consumption is higher due to a higher air resistance, although the air flow was the same in both systems.

From an animal welfare perspective, no conclusions could be drawn regarding the differences of the cooling systems observed in this study. One reason for this was that there was no period of hot weather that was long enough to cause the animals in the reference compartment heat stress. The medical findings of slaughtered animals and the daily increase in weight and feed conversion ratio showed no evidence that they were affected by the different cooling systems. Again, the lack of a long period of hot weather inhibits significant findings.

Concerning the cost-effectiveness, the underfloor air inlet was the most favourable system observed in the study. Compared to the reference compartment, the additional costs could be offset with this system and, depending on the heat generated, further energy cost savings could be made. The high pressure humidifier was the least favourable system in the study since it was the most expensive one. Considering its functional reliability, it was failure-prone due to blocked pipes.

On the whole, the underfloor air inlet was the most advantageous system observed in this study. However, it can only be installed in new buildings, whereas the cooling pad is the best solution for retro-fitting.

8 LITERATUR

- AARNINK, A.J.A. (1997): Ammonia emission from houses for growing pigs as affected by pen design, indoor climate and behaviour. Dissertation Landbouwniversiteit Wageningen, ISSN 90-5485-662-9
- ABSHOFF, A.I. (1974): Künstliche Kühlung von Schweineställen . KTBL-Schrift 175, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt
- ADRION F. (2012): Simulation der Luftströmung im Mastschweineställen mit unterschiedlicher Zuluftführung. Masterarbeit, Institut für Agrartechnik, Universität Hohenheim
- ADRION F.; J. THREM; E. GALLMANN; W. PFLANZ; T. JUNGBLUTH (2013): Simulation der Luftströmung in Mastschweineställen mit unterschiedlicher Zuluftführung. Landtechnik 68 (2), S. 89-94
- ANSYS Inc. (2012): Fluent User's Guide. Handbuch für Lizenznehmer, Version 14.5, Kapitel 5.2.2: Mesh Quality
- BARTUSSEK, H., M. EGERBACHER; J. FLATSCHER, J. GASTEINER, A. HAUSLEITNER, M. SCHUH, A. STEINWIDDER, J. TROXLER, I. WALTER, S. BRETTSCHUH, T. GUGGENBERGER & A. SCHAUER (2001): Die Auswirkung schlechter Stallluft auf Gesundheit und Leistung von Mastschweinen. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, Gumpenstein.
- BECK, J. & P. EPINATJEFF (1997): Innovative Stallsysteme für eine umweltverträgliche Mastschweinehaltung, Erdreichwärmetauscher und nährstoffangepasste Fütterung. BML-Modellvorhaben 1-95 Betrieb Hügler/Gottmadingen, Endbericht 12/1997
- BEYERSDORFER, G. & U. GERNAND (2012): Kühlung von Schweineställen durch Unterflur-Zuluftführung. Landtechnik 67 (3), S. 221-224, Darmstadt
- BJERG, B.S., S. MORSING, K. SVIDT, G. ZHANG (1999): Three-dimensional airflow in a livestock test room with two-dimensional boundary conditions. In: Journal of Agricultural Engineering Research, No. 74, 3, pp. 267-274.
- BJERG, B.S., K. SVIDT, G. ZHANG, S. MORSING (2000): The effects of pen partitions and thermal pig simulators on airflow in a livestock test room. In: Journal of Agricultural Engineering Research, No. 77, 3, pp. 317-326.
- BJERG, B.S., K. SVIDT, G. ZHANG, J.O. JOHNSON (2002a): Modelling of a wall inlet in numerical simulation of airflow in livestock buildings. In: Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development, No. 4, Manuscript BC 01 001.
- BJERG, B.S., K. SVIDT, G. ZHANG, S. MORSING, J.O. JOHNSON (2002b): Modeling of air inlets in CFD prediction of airflow in ventilated animal houses. In: Computers and Electronics in Agriculture, No. 34, 1-3, pp. 223-235.
- BJERG, B.S. & G. ZHANG (2012): CFD analyses of the influence of ventilation system on the effectiveness of a partial pit exhaust. In: International Conference of Agricultural Engineering CIGR-AgEng, Valencia, July 8-12 2012, Paper No. C-0474.

- BJERG, B.S., G. ZHANG & P. KAI (2008): Porous media as boundary condition for air inlet, slatted floor and animal occupied zone in numerical simulation of airflow in a pig unit. In: Proceedings of AgEng 2008 International Conference on Agricultural Engineering, 23-25 June 2008, Crete, Greece, Paper No. OP-1520.
- BLANES-VIDAL, V., E. GUIJARRO, S. BALASCH, A.G. TORRES (2008): *Application of computational fluid dynamics to the prediction of airflow in a mechanically ventilated commercial poultry building*. In: *Biosystems Engineering*, No. 100, 1, pp. 105-116.
- BLENDL, H.M., M. SÜSS, G. KOLLER & J. HÄRTL (1971): Ein Beitrag zum Problem des Kannibalismus beim Schwein. *Züchtungskunde* 43, S. 268-282
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) & BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2011): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Das Energiekonzept der Bundesregierung 2010 und die Energiewende 2011. Berlin
- BOXBERGER, J., H. EICHHORN & H. SEUFERT (1994): Stallmist fest und flüssig, Entmisten- Lagern – Ausbringen. Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, 2. Überarbeitete und erweiterte Auflage, GmbH Beton – Verlag, Düsseldorf
- BRAUN, S. (1997): Untersuchungen eines Schweinehaltungsverfahrens mit Ruheboxen unter ethologischen und gesundheitlichen Gesichtspunkten. Dissertation, Universität Hohenheim. Stuttgart : s.n., 1997.
- BRUCE, J.M. & J.J. CLARK (1979): Models of heat production and critical temperature for growing pigs. *Animal Production* 28 (3), S. 353-369
- BUSCH, B. & G. SCHLENKER (2010): Die Vermeidung von Hitzeschäden bei landwirtschaftlichen Nutztieren (Geflügel, Schweine, Rinder). [Buchverf.] Merkblatt 100 Tierärztliche Vereinigung für Tierschutz e.V. Bramsche : s.n., 2005, S. 7.
- BÜSCHER, W. (1991): Experimentelle Untersuchungen zur Luftführung in Stallanlagen. Bericht 15 der Arbeitsgemeinschaft für Elektrizitätsanwendung in der Landwirtschaft, Diss. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- CIELEJEWSKI, H., M. PILZ, U. STRÖKER, M. BOHRES & M. ZIRON (2010): Abschlussbericht für das KTBL-Projekt zum BMELV-Modellvorhaben landwirtschaftliches Bauen „Kühlung von Schweineställen“ – Teilprojekt „Kühlung eines Sauenstalls“ auf dem Betrieb Finkenbrink.
- DAFA (Deutsche Forschungsallianz) (2012): Fachforum Nutztiere, Wissenschaft, Wirtschaft, Gesellschaft – gemeinsam für eine bessere Tierhaltung; Strategie der Deutschen Agrarforschungsallianz. Braunschweig ISBN 978-3-86576-090-6
- DEMMERS, T.G.M., R.M. KAY & N. TEER (2003): Opportunities to reduce ammonia emissions from pig housing in the UK. Proc. International Symposium on Gaseous and Odour Emissions from Animal Production Facilities, 1-4 June, Horsens, Denmark, 249-256.

- DEN BROK, G.M. & N. VERDOES (1997): Slurry cooling to reduce ammonia emission from pig houses. Proceedings of the International Symposium on Ammonia and Odour Control from Animal Production Facilities, Volumen 2, Vinkeloord, The Netherlands, pp. 411-447 zitiert in GALLMANN (2003)
- DEUTSCHER WETTERDIENST: WitterungsReport Express 04(bis 10) 2012, Jahrgang 14, angefragt 18.04.2013
- DIN 13370 (1998): Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Wärmeübertragung über das Erdreich – Berechnungsverfahren. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN 18910-1 (2004): Wärmeschutz geschlossener Ställe. Wärmedämmung und Lüftung. Teil1: Planungs- und Berechnungsgrundlagen für geschlossene zwangsbelüftete Ställe. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DLG (2005): Aco Funki GmbH, Erdwärmetauscher „Opti-Klima“ Temperatur-Ausgleichswirkung. DLG – Prüfbericht 5520 F, Fokus Test 09/05, Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft e.V., DLG Testzentrum Technik & Betriebsmittel, Groß-Umstadt
- EPINATJEFF, P., J. BECK, T. JUNGBLUTH & A. SCHEUBLE (1997): Kühlere Stallluft – geringere Ammoniakemissionen. Landtechnik 52 (6), S. 320-321
- ESTERMANN, A. (2010): Schweinefachtagung 2010. Optimales Stallklima - Voraussetzungen für hervorragende Leistungen.
- FROSCH, W. & W. BÜSCHER (2001): Einsatz von Flüssigmist-Additiven zur Emissionsminderung. Landtechnik 56 (3), S. 152-153
- GALLMANN, E. (2003): Vergleich von zwei Haltungssystemen für Mastschweine mit unterschiedlichen Lüftungsprinzipien – Stallklima und Emissionen. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 404, Dissertation Universität Hohenheim ISSN 0931-6264
- GEBREMEDHIN, K.G., B.X. WU (2003): Characterization of flow field in a ventilated space and simulation of heat exchange between cows and their environment. In: Journal of thermal biology, No. 28, 4, pp. 301-319.
- GEBREMEDHIN, K.G., B. WU (2005): Simulation of flow field of a ventilated and occupied animal space with different inlet and outlet conditions. In: Journal of thermal biology. No. 30, 5, pp. 343-353.
- GEIßLER, W. (2008): Zuluftsysteme in Schweineställen. Messergebnisse aus den Stallungen des Bildungs- und Wissenszentrums Boxberg. http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/show/1222601_I1/LSZ_Unterflurzuluftsysteme-08%20Stand%202011_04_08_doc.pdf (27.04.2013 11:30)
- GEIßLER, W. (2010): Unterflurzulftkühlung – geeignete Maßnahme zum Heizen und Kühlen? Fachtagung Bau und Technik, Köllitch, 03. März 2010
- GLÜCK, B. (1991): Bausteine der Heizungstechnik (Berechnung – Software), Zustand und Stoffwerte (Wasser – Dampf – Luft), Verbrennungsrechnung. Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin

- GRAUVOGEL, A. (1986): Die Ethologie der Exkretion. *Bayrisches Landwirtschaftliches Jahrbuch*, 63. S. 739-747
- GROOT KOERKAMP, P.W.G., J.H.M. METZ, G.H. UENK, V.R. PHILLIPS, M.R. HOLDER, R.W. SNEATH, J.L. SHORT, R.P. WHITE, J. HARTUNG, J. SEEDORF, M. SCHRÖDER, K.H. LINKERT, S. PEDERSEN, H. TAKAI, J.O. JOHNSEN & C.M. WATHES (1998): Concentrations and Emissions of Ammonia in Livestock Buildings in Northern Europe. *J. Agric. Engng Res.* (70), pp. 79/95
- GROTZ, W., A. GRONAUER & H. SCHÖN (2001): Emissionen bei temperatur- und schadgasgeregelter Lüftung in der Mastschweinehaltung. Tagungsband Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, 6-7 März, Hohenheim, 128-133.
- GUARINO, M., C. FABBRI, P. NAVAROTTO, L. VALLI, G. MOSCATELLI, M. ROSSETTI & V. MAZZOTTA (2003): Ammonia, methane and nitrous oxide emissions and particulate matter concentrations in two different buildings for fattening pigs. *Proc. International Symposium on Gaseous and Odour Emissions from Animal Production Facilities*, 1-4 June, Horsens, Denmark, 140-149.
- GUINGAND, N. (2003): Air quality and reduction of slatted floor in growing finishing pig units. *Proc. International Symposium on Gaseous and Odour Emissions from Animal Production Facilities*, 1-4 June, Horsens, Denmark, 80-87.
- HAHNE, J., D. HESSE & K.-D. VORLOP (1999): Spurengasemissionen aus der Mastschweinehaltung. *Landtechnik* 54 (3), S. 180-181, Darmstadt
- HAHNE, J., D. HESSE & K.-D. VORLOP (1999): Spurengasemissionen aus der Mastschweinehaltung. *Landtechnik* 54 (3), S. 180-181, Darmstadt
- HAMMER, N. (2012): Untersuchung zum Tierwohlbefinden von Mastschweinen bei unterschiedlichen Zuluftvarianten. Masterarbeit, Institut für Agrartechnik, Universität Hohenheim
- HARTUNG, J. (2002): Effects of bioaerosol related particulate matter in animal health. *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft* 235, pp. 119-123
- HÄUßERMANN, A. (2006): Stallklimaregelung und Emissionen – Entwicklung und Evaluierung sensorgestützter komplexer Regelstrategien für die Mastschweinehaltung. *Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift* 443, Dissertation Uni Hohenheim
- HEBER, A.J., J.Q. NI, T.T. LIM, C.A. DIEHL, A.L. SUTTON, R.K. DUGGITALA, B.L. HAYMORE, D.T. KELLY & V.I. ADAMCHUK (2000): Effect of a manure additive on ammonia emission from swine finishing buildings. *Trans. ASAE* (43), 1895- 1902.
- HESSEL, E.F. & H.F.A. VAN DEN WEGHE (2011): Erdwärmetauscher zur ganzjährigen Zuluftkonditionierung im Abferkelstall. *Landtechnik* 66 (3), S. 183-186, Darmstadt
- HILLMAN, P.; N. R. SCOTT; A. V. TIENHOVEN (1985): Physiological Responses and Adaption to Hot and Cold Enviroments. *YOUSEF*, 1985, Band 3: 1-72 zitiert in BÜSCHER (1991)

- HÖLSCHER, R. (2006): Nachrüstlösungen zur Emissionsminderung dezentral entlüfteter Stallungen zur Schweinemast. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 446, Dissertation Universität Hohenheim ISSN 0931-6264
- HORSTMANN, H. (2012): Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Zuluffführungs- und Kühlungssystemen in der Schweinemast. Masterarbeit, Institut für Agrartechnik, Universität Hohenheim
- HOY, S. (2009): Nutztierethologie. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart
- HOY, S., M. GAULY & J. KRIETER (2006): Nutztierhaltung und -hygiene. Verlag Eugen Ulmer KG, Stuttgart
- HULSEN, J. & K. SCHEEPENS (2006): Schweinesignale. BC Zutphen: ROOD BONT Niederlande, 2006.
- ILK DRESDEN (2010): ILK-hx-Dia, Institut für Luft- und Kältetechnik, Dresden, <http://www.ilkdresden.de/hxdia>
- ISENSEE, E. & H. CIELEJEWSKI (1984): Praxiserhebungen zum Einfluß des Stallklimas auf die Leistung von Mastschweinen. Schriftenreihe der Agrarwissenschaftlichen Fakultät der Universität Kiel Heft 66, S. 88-95
- I-TEK (2013): Ventilation „Exatop“ <http://www.i-tek.com/produits-ventilation-poteau-exatop-19.html> 20.03.2013 14:26
- JUNGBLUTH, T. (1987): Underground air cooling for animal houses. Proc. 3rd International Symposium on mechanisation and energy in agriculture, Izmir, Turkey, S. 459-469
- JUNGBLUTH, T., W. BÜSCHER & M. KRAUSE (2005): Technik Tierhaltung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- KAISER, S. (1999): Analyse und Bewertung eines Zweiraumkompoststalles für Mastschweine unter besonderer Berücksichtigung der gasförmigen Stoffströme. Forschungsbericht Agrartechnik, VDI-MEG Schrift 334, Dissertation Georg-August-Universität Göttingen
- KECK, M. (1997): Beeinflussung von Raumluftqualität und Ammoniakemissionen aus der Schweinehaltung durch verfahrenstechnische Maßnahmen. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 299, Dissertation Universität Hohenheim ISSN 0931-6264
- KIRCHGEßNER, M. (2004); Tierernährung, 11. neu überarbeitete Auflage, Verlag DLG, Frankfurt am Main
- KIRSCHNER, K., H. KOSBAB, O. LANGNER, J. PAULUS, H.-H. PETEREIT, W. RASIM & W. RUMP (1976): Klimatechnik in der Tierproduktion. Reihe Luft- und Kältetechnik. HEINRICH, G. VEB Verlag Technik, Berlin
- KNIERIM, U. (1998): Wissenschaftliche Untersuchungen zur Beurteilung der Tiergerechtigkeit. Beurteilung der Tiergerechtigkeit von Haltungssystemen KTBL-Schrift 377. KTBL, 1998, S. 40-50.
- KOBER (2012): Protokoll der Messergebnisse des Reventa Messventilator 650 bei der Firma Ziehl-Abegg. Künzelsau 23.08.2012

- KRAUSE, K.H. & S. Linke (2010): Anlagen- und Lüftungskonzepte. In: Emissionen der Tierhaltung und Minderungsmaßnahmen; Fachgespräch am 27./28. Mai 2010, vTI Braunschweig.
- KRAUSE, K.H., S. Linke, H.J. Müller & M. Mußlick (2009): Simulationen weisen der Luft den Weg - die intelligente Stalllüftung. Landtechnik 64(1), S. 54-56
- KRAUSE, M., J. SEILER-PETZOLD, A. REINHARDT-HANISCH & T. JUNGBLUTH (2010): Unfälle durch Schadgase aus Flüssigmist in schweinehaltenden Betrieben. Landtechnik 65 (6), S. 438-441, Darmstadt
- KRETZSCHMAR, H.-J. & I. KRAFT (2011): Kleine Formelsammlung, Technische Thermodynamik. Carl Hansa Verlag, München
- KTBL (2012): Betriebsplanung Landwirtschaft 2012/13. Datensammlung, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V., Darmstadt
- KTBL (2013): Online – Kalkulationsdaten. Baukosten 2.9, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft <http://daten.ktbl.de/baukost2/> (22.03.2013 18:22)
- KUTTLER, W. (2009): Klimatologie. Verlag Ferdinand Schöningh, Paderborn, ISBN 978-3-8252-3099-9
- LEE, I.B. (2012): Mündliche Mitteilung, 09.07.12; Seoul National University, Department of Rural Systems Engineering, Professor.
- LEHMANN, B., J. BAUMEISTER & K. KLINDTWORTH (2011): Einsatz einer Hochdruck-Vernebelungsanlage zur Kühlung eines Mastschweinestalls. Landtechnik 66 (3), S. 191-193
- LKV (2012): Jahresbericht 2012, Erzeugerringe in Baden-Württemberg, Beratung & Service. Landesverband Baden-Württemberg für Leistungsprüfungen in der Tierzucht e.V., Stuttgart
- LTZ AUGUSTENBERG (2013): Wetterdaten – Infoservice Pflanzenbau & Pflanzenschutz. <http://www.wetter-bw.de/wetterdaten/tabelle/tageswerte/> 21.03.2013 00:41
- LUMASENSE TECHNOLOGIE A/S (2007): Photoacoustic Field Gas-Monitor 1412. Technisches Datenblatt P/N: 80-14498-02, LumaSense Technologies A/S, Ballerup, Denmark.
- LUMASENSE TECHNOLOGIE A/S (2009): Gas Detection Limits. Technisches Datenblatt P/N 83-15005-00-03, LumaSense Technologies A/S, Ballerup, Denmark.
- MAYER, C. (1999): Stallklimatische, ethologische und klinische Untersuchungen zur Tiergerechtheit unterschiedlicher Haltungssysteme in der Schweinemast. Dissertation, FAT-Schriftreihe No. 50, Tänikon, Schweiz. 1999.
- MAYER, C., E. HILLMANN & L. SCHRADER (2006): Verhalten, Haltung, Bewertung von Haltungssystemen. Schweinezucht und Schweinefleischerzeugung (ed. Brade, W. und Flachowsky, G.). Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 296. 2006, S. 94-122.

- MOSTAFA, E, S.H. SONG, K.S. KWON, I.H. SEO, S.W. HONG, H.S. HWANG, J.P. BITOG, H.T. HAN: (2012): Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside broiler building fitted with duct ventilation system. In: Biosystems Engineering, No. 112, 4, pp. 293-303.
- MÜLLER H.-J. & F.-W. VENZLAFF (2007): Untersuchung einer Unterflurzuluffführung in der Schweinemast. Landtechnik 62 (4), S 226 – 227, Darmstadt
- MUßHOFF, O. & N. HIRSCHAUER (2011): Modernes Agrarmanagement. Betriebswirtschaftliche Analyse- und Planungsverfahren. Verlag Franz Vahlen, München.
- NAVAROTTO, P., G. BONAZZI, C. FABRI & M. GUARINO (2000): New systems of manure removal to reduce gas emissions in existing pig housing. In: Proc. 9th International Conference in the FAO ESCORENA Network on Recycling of Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture (RAMIRAN 2000), F. Sangiorgi (Ed.), Gargnano, Italy, 6-9 September 2000, 381-383
- NI, J. (1998): Emission of carbon dioxide and ammonia from mechanically ventilated pig house. Doctoraatsproefschrift Nr. 338 aan de Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen van de K.U. Leuven.
- NIETHAMMER F. (2000): Stallventilator Ziehl-Abegg FE 071-4IQ.4I.3Z (Ziehl-Abegg GmbH & Co. KG), DLG Prüfbericht Nr. 4841, Groß-Umstadt
- NORTON, T., J. Grant; R. FALLON, D.W. SUN (2010a): Improving the representation of thermal boundary conditions of livestock during CFD modelling of the indoor environment. In: Computers and Electronics in Agriculture, No. 73, 1, pp. 17-36.
- NORTON, T., J. Grant; R. FALLON, D.W. SUN (2010b): A computational fluid dynamics study of air mixing in a naturally ventilated livestock building with different porous eave opening conditions. In: Biosystems Engineering, No. 106, 2, pp. 125-137.
- NORTON, T., D.W. SUN, J. GRANT, R. FALLON & V. DODD (2007): Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modeling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. Bioresource technology 98(12), S. 2386-2414
- ODENING, M. & W. BOKELMANN (2000): Agrarmanagement. Landwirtschaft, Gartenbau. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart.
- PEDERSEN, S. & K. SÄLLVIK (2002): CIGR 4th Report Working Group on Climatization of Animal Houses. Published by Research Centre Bygholm, Horsens (DK), ISBN 87-88976-60-2
- PEDERSEN, S. , H. TAKAI, J.O. JOHNSEN, J.H.M. METZ, P.W.G. GROOT KOERKAMP, G.H. UENK, V.R. PHILLIPS, M.R. HOLDEN, R.W. SNEATH, J.L. SHORT, R.P. WHITE, J. HARTUNG, J. SEEDORF, M. SCHRÖDER, K.H. LINKERT & C.M. Wathes (1998): A Comparison of Three Balance Methods for Calculating Ventilation Rates in Livestock Buildings. J. Agric. Engng Res. (70), pp. 25/37
- PFLANZ, W. (2007): Gesamtheitliche Beurteilung innovativer Schweinemastverfahren für Baden-Württemberg. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 466, Dissertation Uni-Hohenheim
- PRANGE, H. (2004): Gesundheitsmanagement Schweinehaltung. Stuttgart : Eugen Ulmer Verlag, 2004.

- RATHMER, B.(2002): Vergleich klima- und umweltrelevanter Emissionen aus Haltungssystemen für Mastschweine. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 386, Dissertation Technische Universität München, ISSN 0931-6264
- RATSCHOW, J.-P., R. SCHULTER-SUTRUM, W. BÜSCHER, C. NANNEN, B. FELLER (2008): DLG-Merkblatt 346 Kühlung von Schweineställen. DLG e.V., Frankfurt am Main
- REVENTA (2008): Elektro-Montageanleitung Messventilator. D-Horstmar.
- ROLLER, W.L. & R. F. GOLDMAN (1969): Response of swine to acute heat exposure. Transactions of the ASAE 12(2) 164-169, 174
- ROM, H.B. & P.J. DAHL (2002): Influence of room temperature on ammonia emission from confined slaughter pig units. Proc.AgEng2002, Budapest, Hungary, 7 p. paper-no. 02-SE-025.
- RÖSMANN, P.: (2012): Einsatz von regenerativen Energiequellen zum Heizen und Kühlen von zwangsbelüfteten Tierställen. Forschungsbericht Agrartechnik, VDI-MEG Schrift 509, Dissertation Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- SCHIER, F. & W. BÜSCHER (2004): Kombinierte Abluftreinigungsanlagen an Schweineställen. Landtechnik 59 (3), S. 160-161, Darmstadt
- SEIFERT, C., D. WIETZKE & S. FRITZSCHE (2009): Energie für Heizung und Lüftung in der praktischen Schweinehaltung. Landtechnik 64 (6), S.423-425, Darmstadt
- SEO, I.H., I.B. LEE, O.K. MOON, S.W. HONG, H.S. HWANG, J.P. BITOG, K.S. KWON, Z. YE & J.W. LEE (2012): Modeling of internal environmental conditions in a full-scale commercial pig house containing animals. In: Biosystems Engineering 111(1), S. 91-106
- SEUFERT, H. (1986): Planungsgrundlagen zur Ausführung raumluftechnischer Anlagen für die Lufterneuerung in Schweineställen. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG) Schrift 116, Habilitation Landtechnik Gießen
- SNEATH, R.W., V.R. PHILLIPS, T.G.M. DEMMERS, L.R. BURGESS, J. L. SHORT & S.K. WELCH (1997): Long term measurements of greenhouse gas emissions from UK livestock buildings. In: Bottcher, R. & S.J. Hoff (Eds.), Proc. ASAE International Symposium on Livestock Environment V, 29-31 May, Bloomington, Minnesota, USA, 146-153.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2013): Preise, Daten zur Energiepreisentwicklung – Lange Reihen von Januar 2000 bis Februar 2013- Destatis wissen nutzen, erschienen am 28.3.2013, Wiesbaden, Artikelnummer: 5619001131024
- STEGBAUER, B. (1996): Eignung verschiedener Ammoniakmessgeräte auf ihre Einsatztauglichkeit für Langzeitmessungen in Ställen. Diplomarbeit Technische Universität München, Institut für Landtechnik, unveröffentlicht.

- STOLPE, J. & B. BRESK (1985): Stallklimagegestaltung, Tierphysiologische Grundlagen und Normative. Angewandte Tierhygiene Band 9, Herausgeber W. Kurzweg & K. Winkler, Gustav Fischer Verlag, Jena
- STROMBAUGH, D.P., H.S. TEAGUE & W.L. ROLLER (1969): Effects of atmospheric ammonia on the pig. *Journal of Animal Science* 28, S. 844-847
- SUN, H. (2004): Theoretical and experimental study of a high rise hog building for improved utilization and environmental quality protection. Dissertation, Ohio State University.
- SUN, H., R.R. STOWELL, H.M. KEENER, F.C. Michel Jr. (2002): Two-dimensional computational fluid dynamics (CFD) modeling of air velocity and ammonia distribution in a High-Rise™ hog building. In: *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, No. 45, 5, pp. 1559-1568.
- SUNDRUM, A. (1998): Welchen Beitrag leistet die ökologische Tierhaltung im Hinblick auf die Beurteilung der Nachhaltigkeit? In: *Bornimer Agrartechnische Berichte*, Heft 22 Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim. 1998, S. 123-130.
- SUNDRUM, A., R. ANDERSON & G. POSTLER (1994): Tiergerechtheitsindex 200/1994. Ein Leitfaden zur Beurteilung von Haltungssystemen. Bonn : Köllen Druck+Verlag GmbH, 1994.
- TA Luft (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) vom 24. Juli 2002. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, GMBI. 2002, Heft 25 – 29, S. 511 - 605
- THREM, J., E. GALLMANN, W. PFLANZ & T. JUNGBLUTH (2011): Vergleich von Zuluftführungs- und Kühlungssystemen in der Schweinemast. *Landtechnik* 66 (5), S. 349-353, Darmstadt
- TIEDEMANN, H. (1991): Erdwärmetauscher für Schweineställe. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft S.V., KTBL-Schrift 340, Darmstadt
- TierSchG, (2010): Tierschutzgesetz „Tierschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. Mai 2006 (BGBl. I S. 1206, 1313), das zuletzt durch Artikel 20 des Gesetzes vom 9. Dezember 2010 (BGBl. I S. 1934) geändert worden ist“
- TierSchutzNutzV (2009): „Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 22. August 2006 (BGBl I S. 2043), die durch die Verordnung vom 1. Oktober 2009 (BGBl I S. 3223) geändert worden ist“
- UBA (Umweltbundesamt) (2012): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2012, nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausinventar 1990 – 2010, Dessau-Roßlau, <http://www.uba.de/uba-info-medien/4292.html> (16.04.2013 11:34)
- VAN CAENEGEM, L. & B. WECHSLER (2000): Stallklimawerte und ihre Berechnung. FAT- Schriftenreihe 51. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, (CH) Tänikon

- VAN CAENEGEM, L. (2007): Zuluft aus dem Hohlraum unter dem Stall. ART-Bericht Nr. 672, Tänikon, Ettenhausen (CH)
- VAN CAENEGEM, L. & D. DIDIER (1998): Erdwärmetauscher für Mastschweineeställe. Schriftenreihe der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Nr. 48, Tänikon (Schweiz)
- VAN CAENEGEM, L., M. SAX & M. SCHICK (2012): Wärmerückgewinnungsanlagen – auch zum Kühlen. Landtechnik 67 (3), S. 216-220, Darmstadt
- VAN CAENEGEM, L.; G. JOHL; M. SAX; A. SLTERMANN (2010): Energiebedarf bei Heizung und Lüftung mehr als halbieren. ART-Bericht 735, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, CH Tänikon
- VAN DEN WEGHE, H. (1998): Beurteilung der Tiergerechtheitsindizes TGI 35-L und TGI 200/1994. Beurteilung der Tiergerechtheit von Haltungssystemen KTBL-Schrift 377. KTBL, 1998, S. 110-119.
- VAN DEN WEGHE, H. (2001): Ammoniak-Emissionen der Schweinehaltung und Minderungsmaßnahmen. KTBL/UBA-Symposium – Emissionen der Tierhaltung und Beste Verfügbare Techniken zur Emissionsminderung, Bildungszentrum Kloster Banz, 3-5 Dez, KTBL-Schrift 406, 73-93.
- VAN DEN WEGHE, H., MEISSNER, P. & KIUNTKE M. (2005): Flushing litterless fattening houses with biologically treated slurry (SBR plant) – effects of flushing rate, percentage of treated slurry and seasons on gaseous emissions (methane, ammonia, nitrous oxide, carbon dioxide and odour). In: Precision Livestock Farming 2005, S. Cox (Ed.), Wageningen Academic Publishers, The Netherlands, S. 73-80. ISBN 907699868X.
- VAN DEN WEGHE, H.; W. BÜSCHER; P. CREMER; B. FELLER (2007): Berechnung- und Planungsgrundlagen für das Klima in geschlossenen Ställen, AEL-Heft 17. Arbeitsgemeinschaft für Elektrizitätsanwendung in der Landwirtschaft e. V. AEL, Berlin
- VAN WAGENBERG, A., B.S. BJERG, G. BOT (2004): Measurement and simulation of climatic conditions in the animal occupied zone in a door ventilated room for piglets. In: Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development, No. 6, Manuscript BC 03 020.
- VENZLAFF, F.-W. & H.J. MÜLLER (2008): Untersuchungen zur Verbesserung der Klimagestaltung in Schweineeställen bei gleichzeitiger Verringerung der Emissionen. Ministerium für ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (MLUV), Reihe Landwirtschaft, Band 9 Heft III, Frankfurt (Oder)
- VON BÖCKH, P. (2006): Wärmeübertragung, Grundlagen und Praxis. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- VRANKEN, E., P. DARIUS, J. HENDRIKS, S. CLAES & D. BERCKMANS (2002): Development of a shortened procedure for the determination of ammonia emission from livestock buildings. International Conference on Agricultural Engineering, Proc.AgEng2002, Budapest, Hungary, paper-No. 02-SE-063, 8 p.

- WEBER, R. & A. VALLE ZÁRATE (2005): Der Begriff Wohlbefinden in der Nutztierhaltung - Diskussion aktueller Definitionsansätze als Grundlage für praxisorientierte Forschung am Beispiel Mastschweinehaltung. Dummerstorf: Archiv Tierzucht, 2005. S. 475-489.
- ZALUDIK, K. (2002) Bewertung praxisüblicher Mastschweinehaltungen in Nordrhein-Westfalen hinsichtlich der Tiergerechtigkeit. Dissertation. Universität Hohenheim
- ZHANG, G., K. SVIDT, B.S. BJERG, S. MORSING (1999): Buoyant flow generated by thermal convection of a simulated pig. In: Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, No. 42, 4, pp. 1113-1120.

9 ANHANG

Tabellen

Tab. A 1:	Mehrkostenberechnung der Kuhlungssysteme im Bezug zum Referenzabteil unter der Annahme einer negativen Entwicklung der Energiepreise. Verbrauchswerte aus dem Mittelwert der Jahresverbrauche 2011 und 2012 gebildet.	209
Tab. A 2:	Mehrkostenberechnung der Kuhlungssysteme im Bezug zum Referenzabteil unter der Annahme einer Trendentwicklung der Energiepreise. Verbrauchswerte aus dem Mittelwert der Jahresverbrauchen 2011 und 2012 gebildet.	209

Abbildungen

Abb. A 1:	Montageanleitung mit Umrechnungstabelle für die einzelnen Messventilatoren (REVENTA, 2008)	210
Abb. A 2:	Buchtenverschmutzung über alle Beobachtungen in Abteil C2 (HDB). Zusammenfassung des ersten Versuchszeitraums (12 Beobachtungstage 2011).	211
Abb. A 3:	Buchtenverschmutzung über alle Beobachtungen in Abteil C3 (Unterflur). Zusammenfassung des ersten Versuchszeitraums (12 Beobachtungstage 2011).	211
Abb. A 4:	Buchtenverschmutzung innerhalb des Abteils C2 (HDB) im zweiten Versuchszeitraum (12 Beobachtungstage2011).	212
Abb. A 5:	Buchtenverschmutzung innerhalb des Abteils C3 (Unterflur) im zweiten Versuchszeitraum (12 Beobachtungstage2011).	213
Abb. A 6:	Buchtenverschmutzung über alle Beobachtungen in Abteil C2 (HDB). Zusammenfassung des ersten Versuchszeitraums (18 Beobachtungstage 2012).	214
Abb. A 7:	Buchtenverschmutzung über alle Beobachtungen in Abteil C3 (Unterflur). Zusammenfassung des ersten Versuchszeitraums (17 Beobachtungstage 2012).	214
Abb. A 8:	Buchtenverschmutzung innerhalb des Abteils C1 (Referenz) im zweiten Versuchszeitraum (17 Beobachtungstage2012).	215
Abb. A 9:	Buchtenverschmutzung innerhalb des Abteils C2 (HDB) im zweiten Versuchszeitraum (18 Beobachtungstage2012).	216
Abb. A 10:	Buchtenverschmutzung innerhalb des Abteils C3 (Unterflur) im zweiten Versuchszeitraum (17 Beobachtungstage2012).	217
Abb. A 11:	Buchtenverschmutzung über alle Beobachtungen von Betrieb A (EWT). Zusammenfassung des ersten Versuchszeitraums (9 Beobachtungstage).	218
Abb. A 12:	Buchtenverschmutzung über alle Beobachtungen von Betrieb B (Unterflur). Zusammenfassung des ersten Versuchszeitraums (5 Beobachtungstage).	218
Abb. A 13:	Buchtenverschmutzung über alle Beobachtungen von Betrieb C (HDB). Zusammenfassung des ersten Versuchszeitraums (5 Beobachtungstage).	218

Tab. A 1: Mehrkostenberechnung der Kühlungssysteme im Bezug zum Referenzabteil unter der Annahme einer negativen Entwicklung der Energiepreise. Verbrauchswerte aus dem Mittelwert der Jahresverbräuche 2011 und 2012 gebildet.

Negativwerte (aktuelle Werte)				
€ TP⁻¹	Kühlpad	HDB	Unterflur	Unterflur + Wärmenutzung
Abschreibung	0,77	3,11	2,91	2,91
Zinsansatz (8%)	0,03	0,12	0,11	0,11
Lohnkosten	1,77	1,08	-	-
Strom	0,75	0,46	-1,45	-1,45
Wasser	0,28	0,11	-	-
Heizersparnis	-	-	-	-4,92
Kostendifferenz zum Referenzabteil	3,60	4,89	1,57	-3,35

Tab. A 2: Mehrkostenberechnung der Kühlungssysteme im Bezug zum Referenzabteil unter der Annahme einer Trendentwicklung der Energiepreise. Verbrauchswerte aus dem Mittelwert der Jahresverbräuchen 2011 und 2012 gebildet.

Trendwerte (aktuelle Werte)				
€ TP⁻¹	Kühlpad	HDB	Unterflur	Unterflur + Wärmenutzung
Abschreibung	0,77	3,11	2,91	2,91
Zinsansatz (8%)	0,03	0,12	0,11	0,11
Lohnkosten	1,77	1,08	-	-
Strom	0,59	0,36	-1,14	-1,14
Wasser	0,28	0,11	-	-
Heizersparnis	-	-	-	-4,10
Kostendifferenz zum Referenzabteil	3,44	4,79	1,88	-2,22



Montageanleitung

Zusammenfassung Messventilatoren

	Ø 370	Ø 420	Ø 470	Ø 520	Ø 580	Ø 650	Ø 730	Ø 820	Ø 920
	[m³/H]								
Drehzahl									
U/min									
40					440	560	730	930	1220
50	170	260	320	450	550	700	910	1180	1560
750	250	390	480	675	830	1050	1370	1820	2400
100	330	520	640	900	1100	1400	1830	2470	3250
125	410	650	800	1125	1380	1750	2280	3110	4090
150	500	780	960	1350	1650	2100	2740	3750	4930
175	580	910	1120	1575	1930	2450	3110	4390	5780
200	660	1040	1280	1800	2200	2800	3750	5030	6620
225	740	1170	1440	2025	2480	3150	4390	5670	7470
250	830	1300	1600	2250	2750	3500	5030	6310	8310
275	910	1430	1760	2475	3030	3850	5670	6950	9150
300	990	1560	1920	2700	3300	4200	6310	7600	10000
325	1070	1690	2080	2925	3580	4550	6950	8240	10840
350	1160	1820	2240	3150	3850	4900	7600	8880	11690
375	1240	1950	2400	3375	4130	5250	8240	9520	12530
400	1320	2080	2560	3600	4400	5600	8880	10160	13370
425	1400	2210	2720	3825	4680	5950	9520	10800	14220
450	1490	2340	2880	4050	4950	6300	10160	11440	15060
475	1570	2470	3040	4275	5230	6650	10800	12080	15910
500	1650	2600	3200	4500	5500	7000	11440	12730	16750
525	1730	2730	3360	4725	5780	7350	12080	13370	17590
550	1820	2860	3520	4950	6050	7700	12730	14010	18440
575	1900	2990	3680	5175	6330	8050	13370	14650	19280
600	1980	3120	3840	5400	6600	8400	14010	15290	20130
625	2060	3250	4000	5625	6880	8750	14650	15930	20970
650	2150	3380	4160	5850	7150	9100	15290	16570	21810
675	2230	3510	4320	6075	7430	9450	15930	17210	22660
700	2310	3640	4480	6300	7700	9800	16570	17860	23500
725	2390	3770	4640	6525	7980	10150	17210	18500	24350
750	2480	3900	4800	6750	8250	10500	17860	19140	25190
775	2560	4030	4960	6975	8530	10850	18500	19780	
800	2640	4160	5120	7200	8800	11200	19140	20420	
825	2720	4290	5280	7425	9080	11550	19780	21060	
850	2810	4420	5440	7650	9350	11900	20420		
875	2890	4550	5600	7875	9630	12250	21060		
900	2970	4680	5760	8100	9900	12600			
925	3050	4810	5920	8325	10180	12950			
950	3140	4940	6080	8550	10450	13300			
975	3220	5070	6240	8775	10730				
1000	3300	5200	6400	9000	11000				
1025	3380								
1050	3470								
1075	3550								
1100	3630								

97 03 002 D1

Abb. A 1: Montageanleitung mit Umrechnungstabelle für die einzelnen Messventilatoren (REVENTA, 2008)

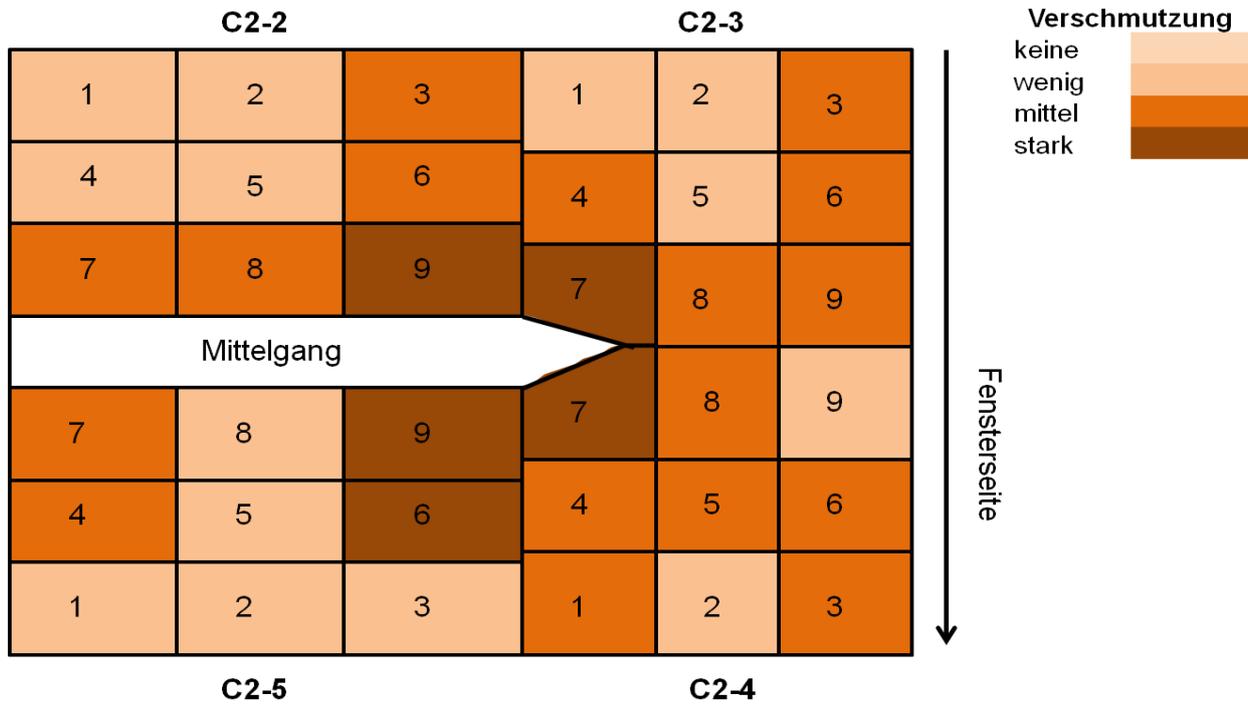


Abb. A 2: Buchtenverschmutzung über alle Beobachtungen in Abteil C2 (HDB). Zusammenfassung des ersten Versuchszeitraums (12 Beobachtungstage 2011).

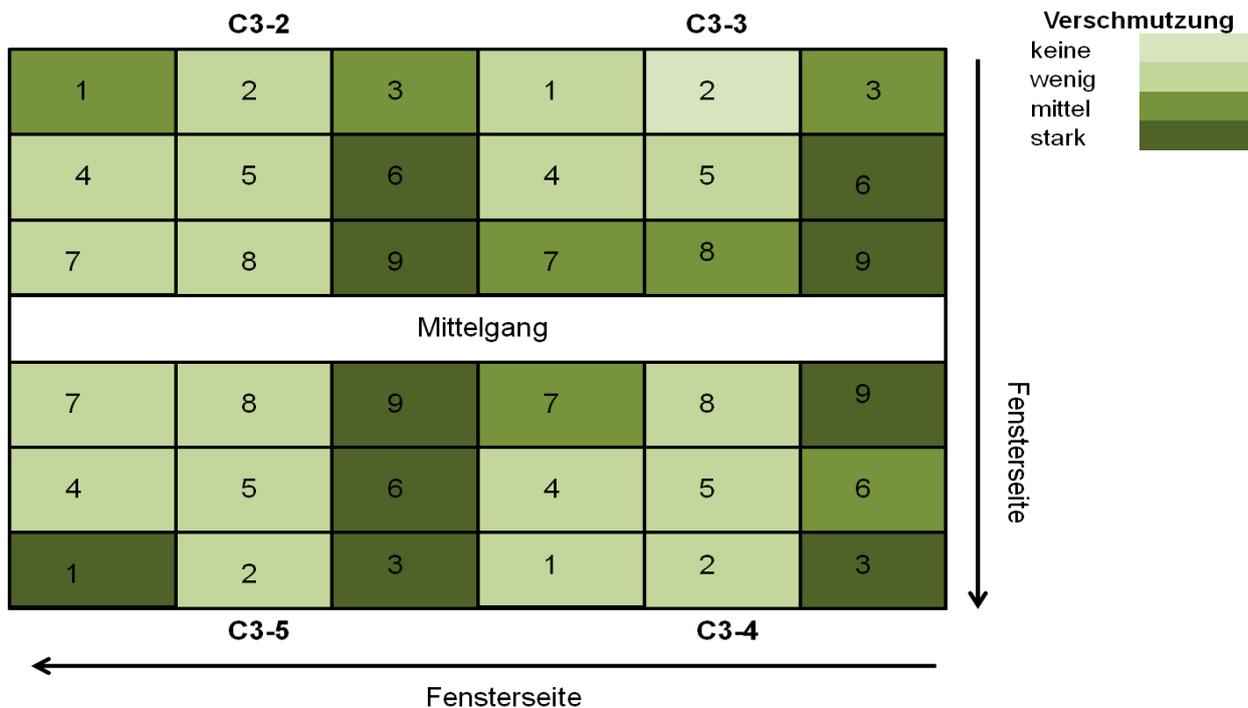


Abb. A 3: Buchtenverschmutzung über alle Beobachtungen in Abteil C3 (Unterflur). Zusammenfassung des ersten Versuchszeitraums (12 Beobachtungstage 2011).

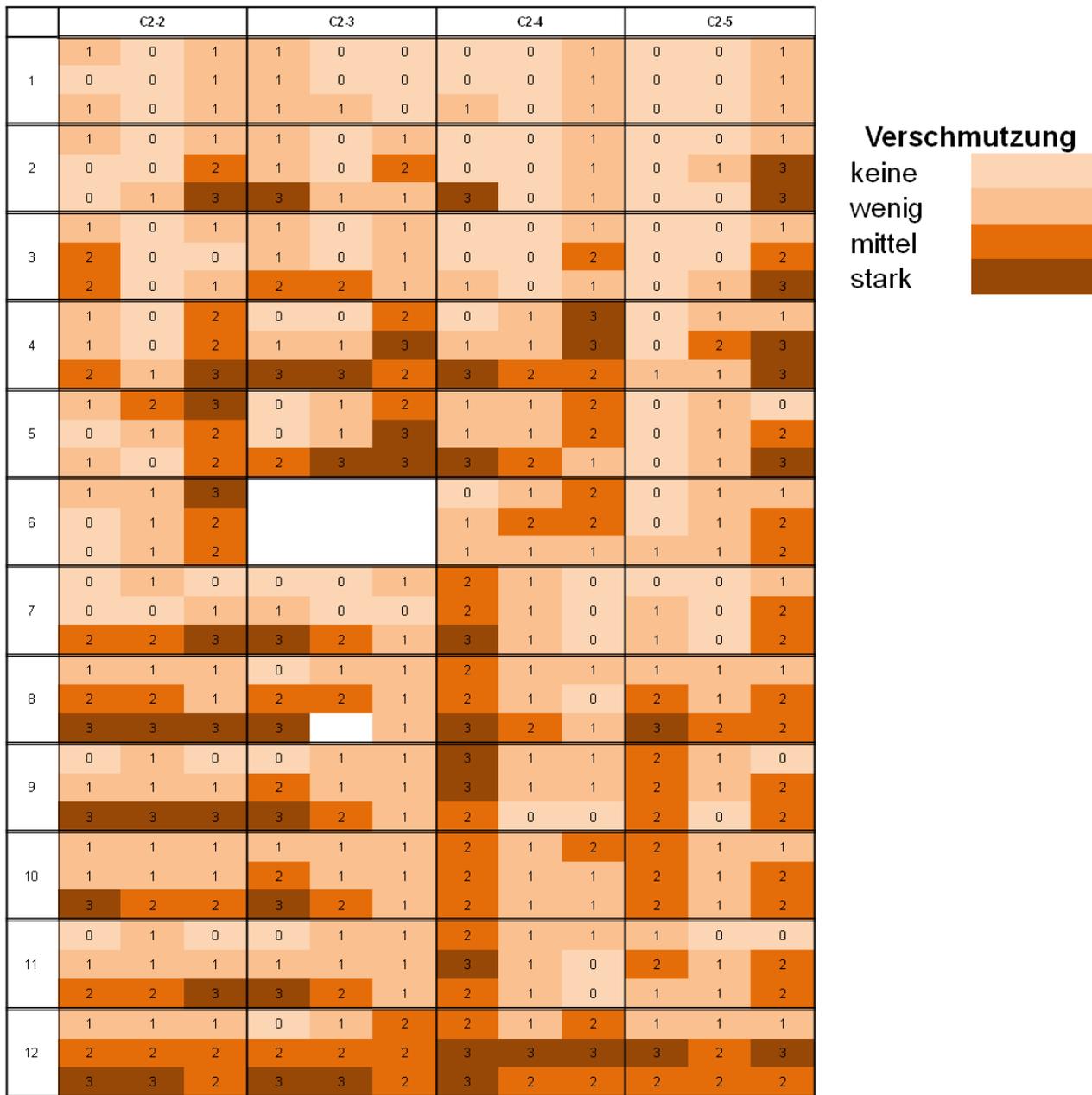


Abb. A 4: Buchtenverschmutzung innerhalb des Abteils C2 (HDB) im zweiten Versuchszeitraum (12 Beobachtungstage 2011).

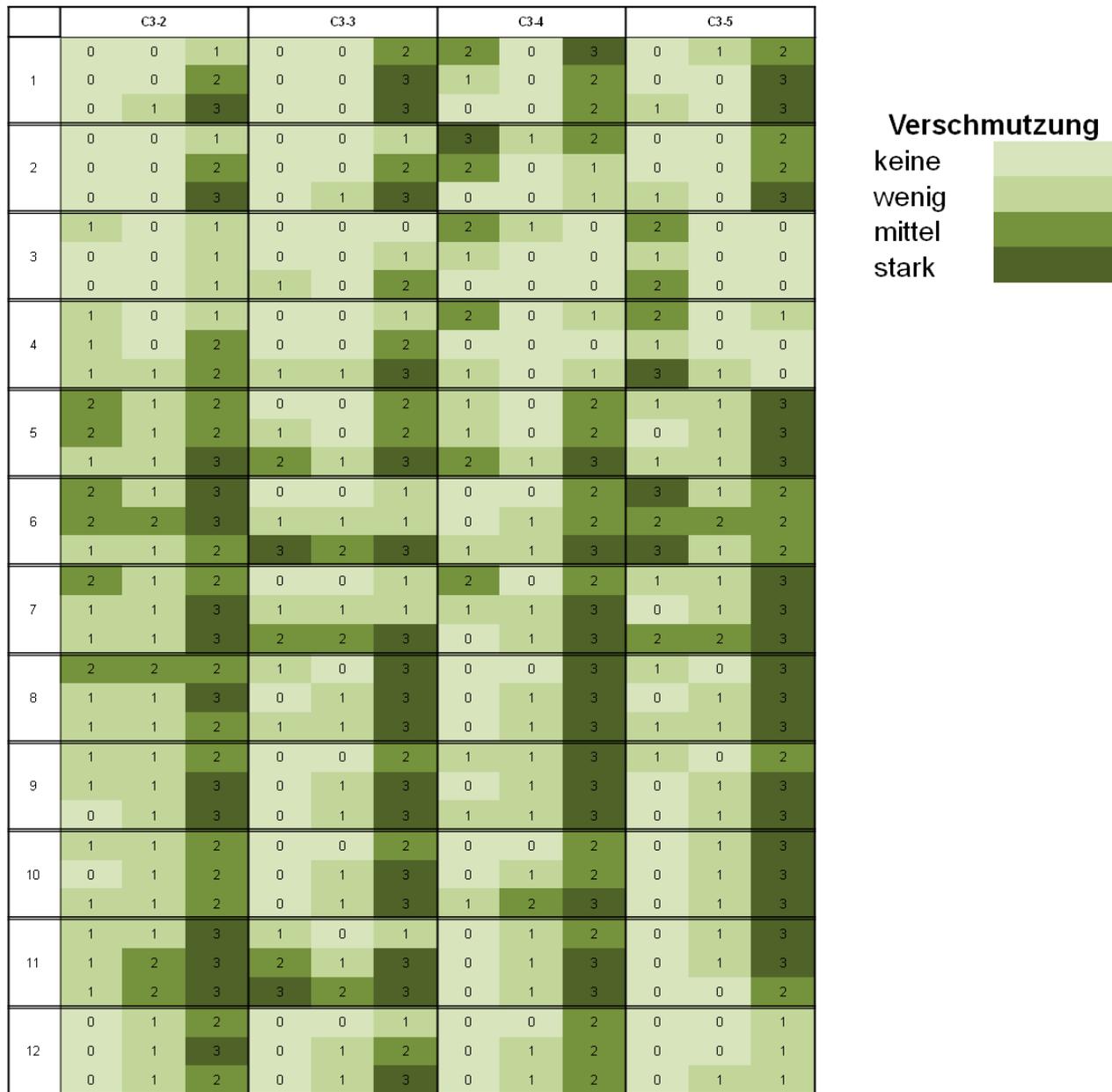


Abb. A 5: Buchtenverschmutzung innerhalb des Abteils C3 (Unterflur) im zweiten Versuchszeitraum (12 Beobachtungstage 2011).

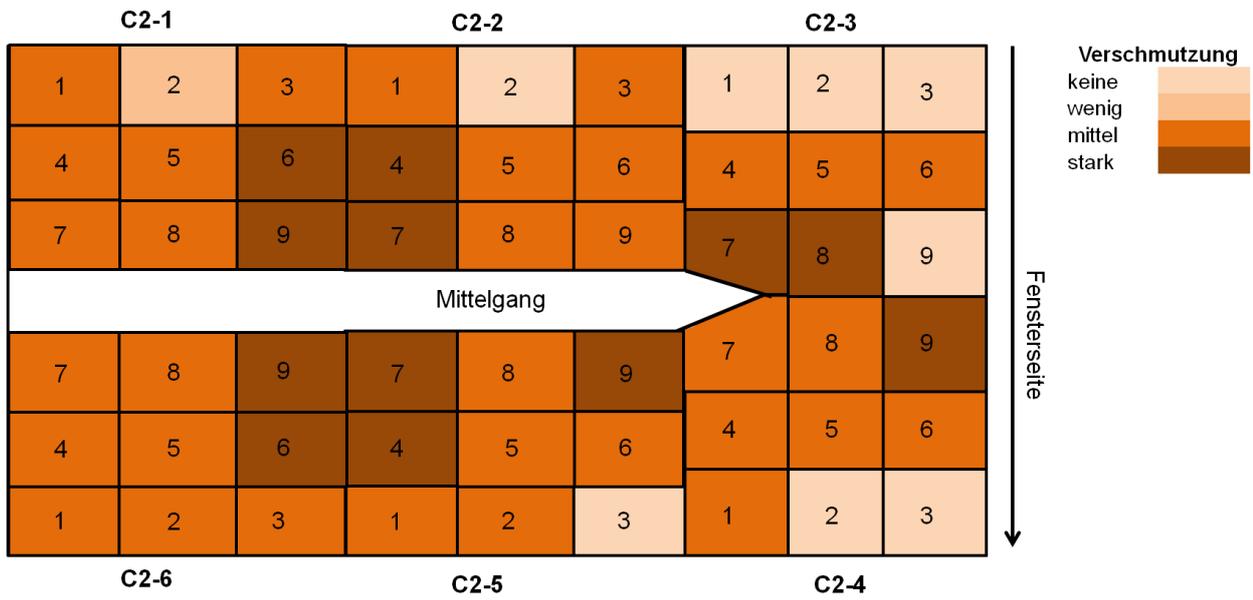


Abb. A 6: Buchtenverschmutzung über alle Beobachtungen in Abteil C2 (HDB). Zusammenfassung des ersten Versuchszeitraums (18 Beobachtungstage 2012).

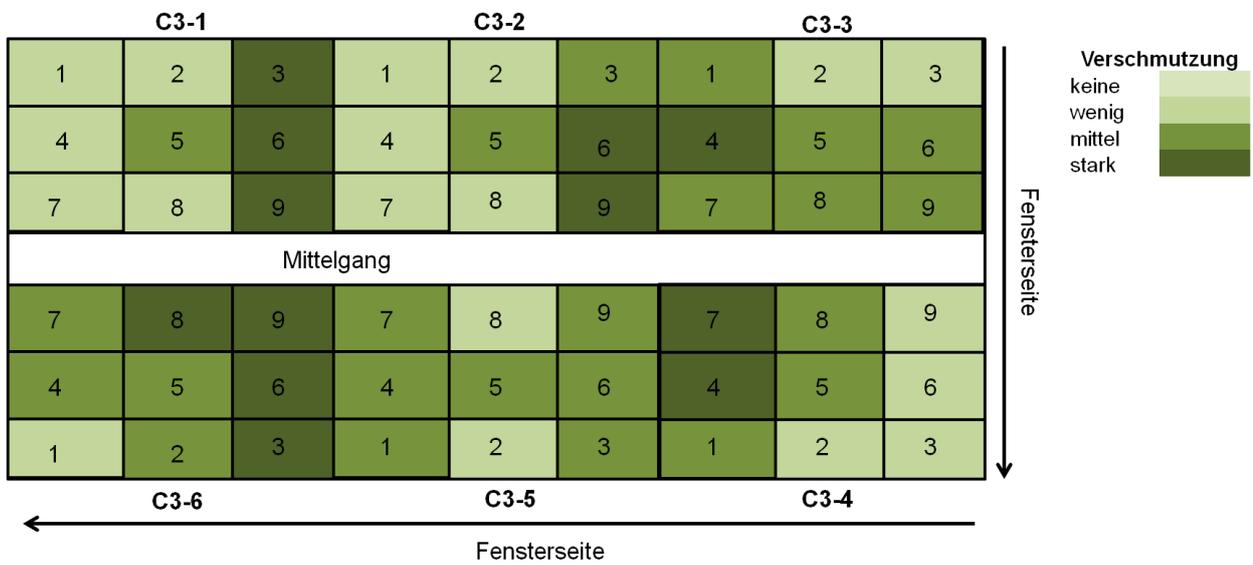


Abb. A 7: Buchtenverschmutzung über alle Beobachtungen in Abteil C3 (Unterflur). Zusammenfassung des ersten Versuchszeitraums (17 Beobachtungstage 2012).

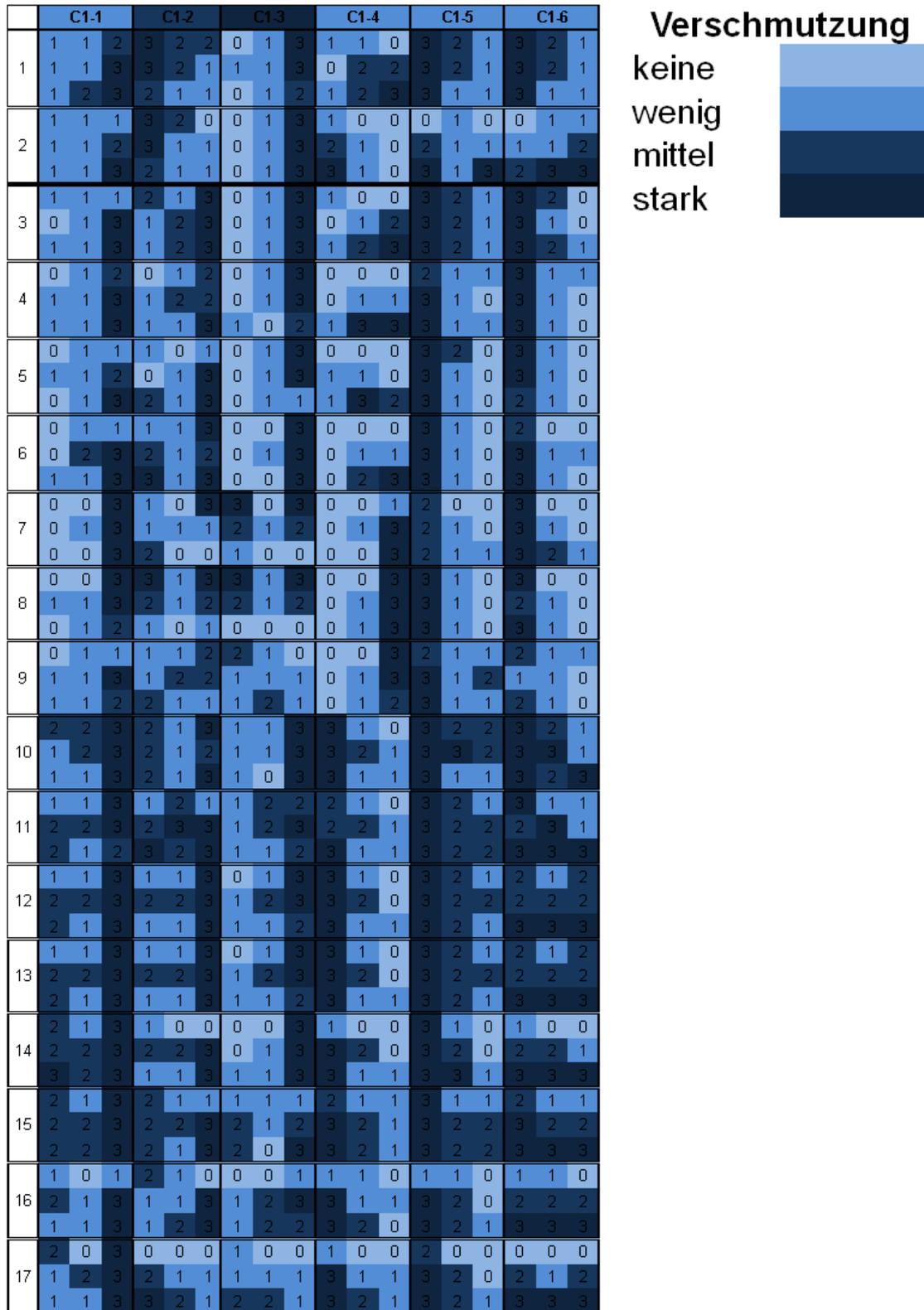


Abb. A 8: Buchtenverschmutzung innerhalb des Abteils C1 (Referenz) im zweiten Versuchszeitraum (17 Beobachtungstage2012).

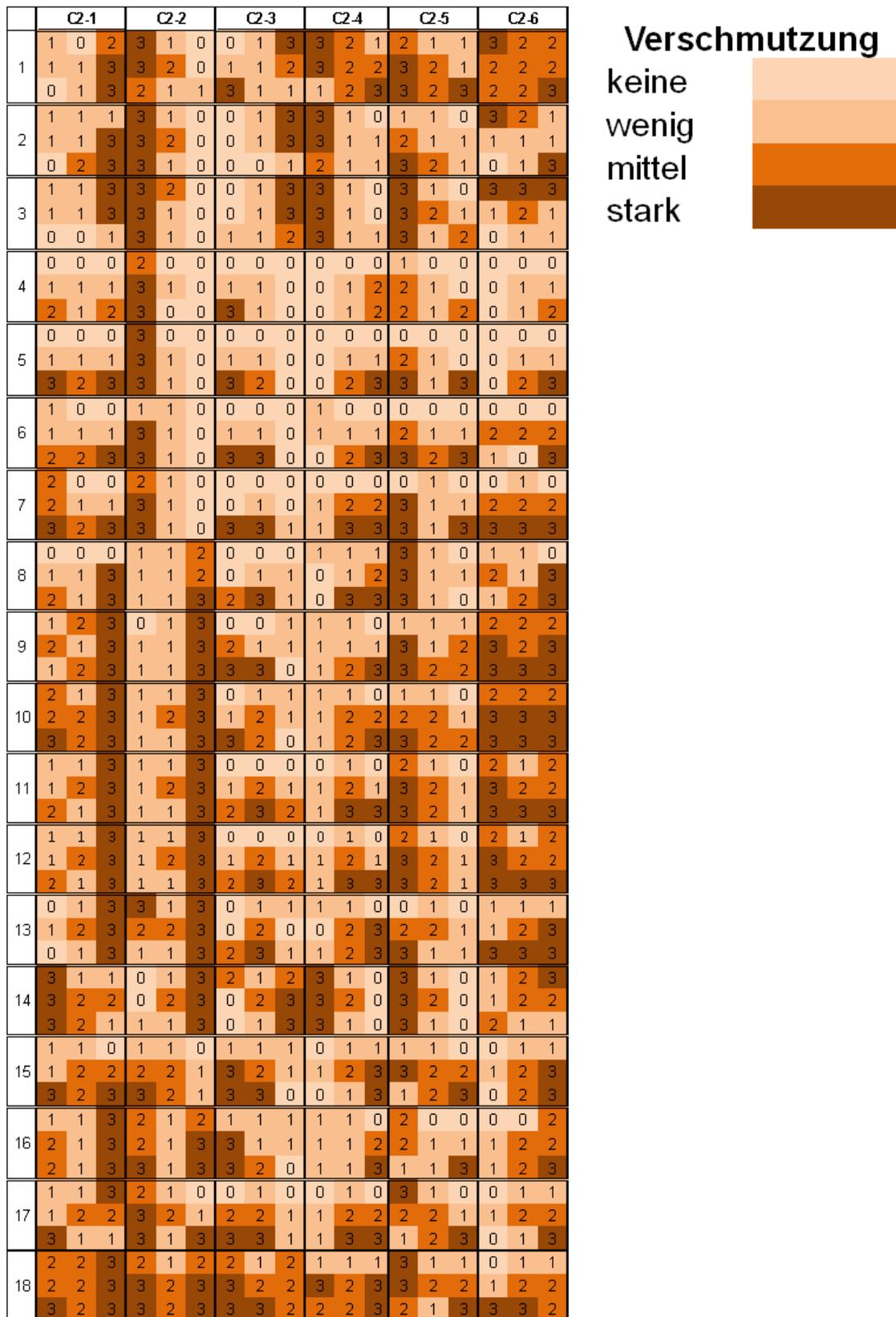


Abb. A 9: Buchtenverschmutzung innerhalb des Abteils C2 (HDB) im zweiten Versuchszeitraum (18 Beobachtungstage 2012).

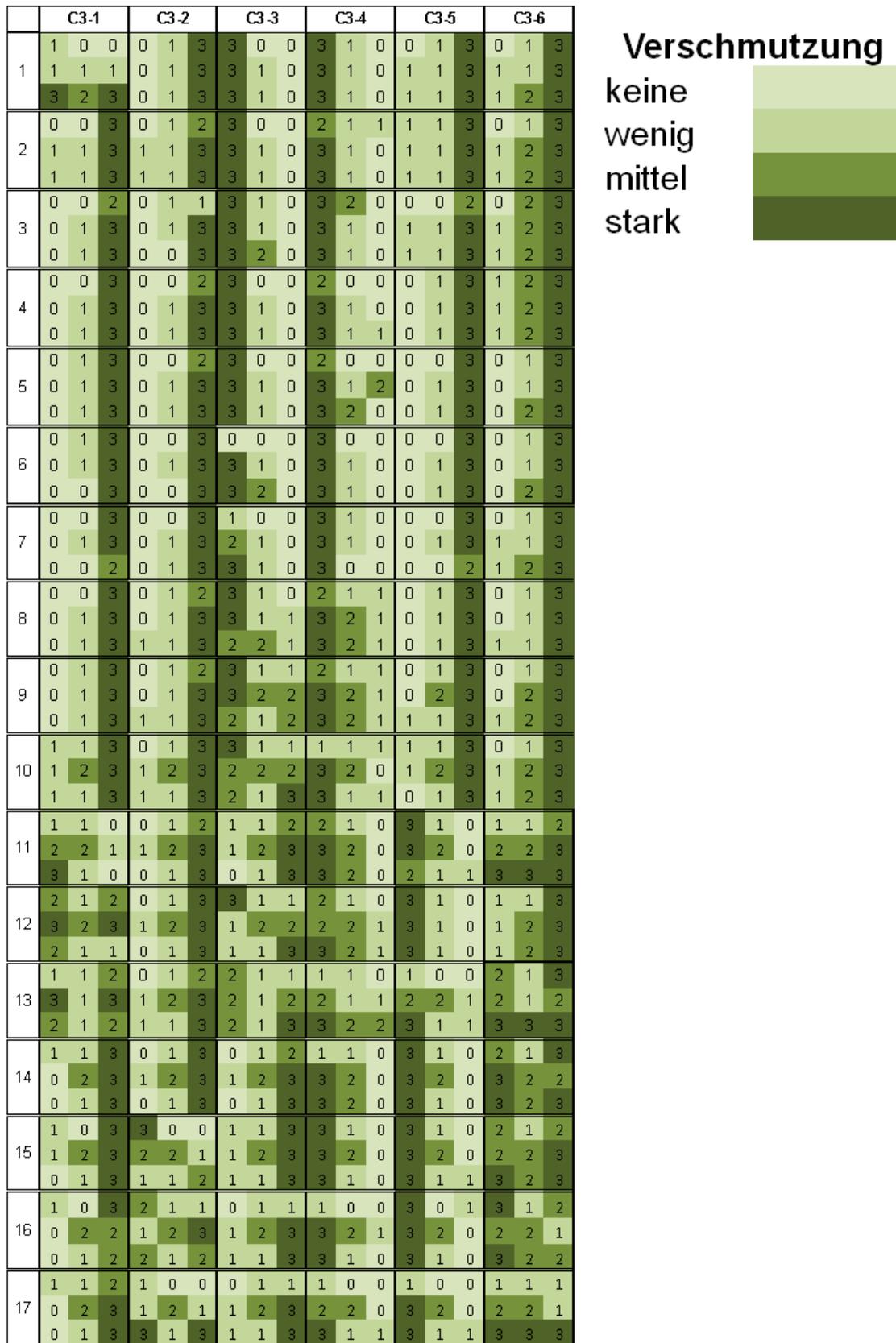


Abb. A 10: Buchtenverschmutzung innerhalb des Abteils C3 (Unterflur) im zweiten Ver-
suchszeitraum (17 Beobachtungstage 2012).

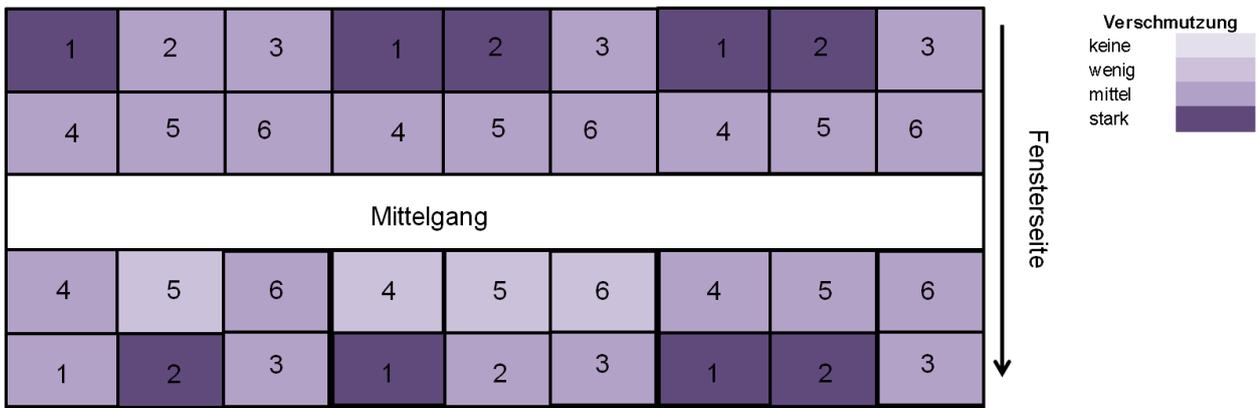


Abb. A 11: Buchtenverschmutzung über alle Beobachtungen von Betrieb A (EWT). Zusammenfassung des ersten Versuchszeitraums (9 Beobachtungstage).

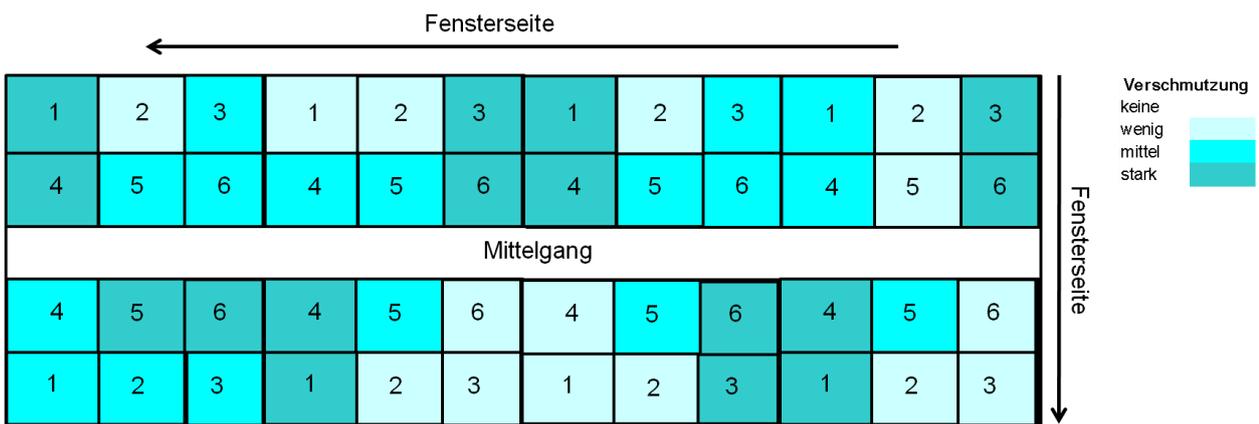


Abb. A 12: Buchtenverschmutzung über alle Beobachtungen von Betrieb B (Unterflur). Zusammenfassung des ersten Versuchszeitraums (5 Beobachtungstage).

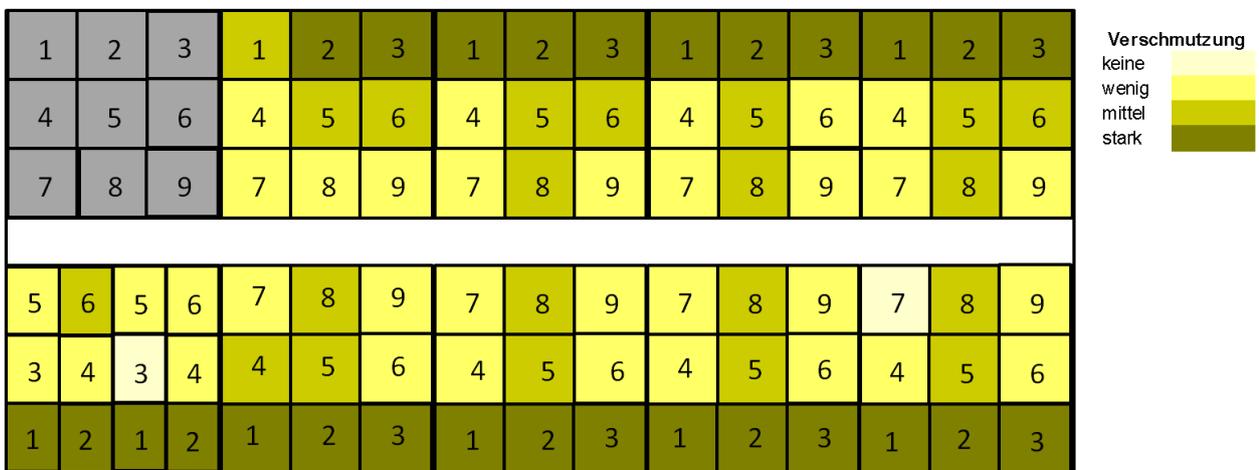


Abb. A 13: Buchtenverschmutzung über alle Beobachtungen von Betrieb C (HDB). Zusammenfassung des ersten Versuchszeitraums (5 Beobachtungstage).

ISSN 0931-6264