

# **Entwicklung eines innovativen, nachrüstbaren Moduls zur Luftkonditionierung zur Optimierung der Stallluftqualität in Schweineställen**

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. sc. agr.)

der Fakultät für Agrarwissenschaften der

Georg-August-Universität Göttingen



vorgelegt von

Hendrik Halewat

geboren am 05.07.1987 in Herford

Göttingen, im August 2022

1. Gutachterin:

Prof. Dr. Imke Traulsen

2. Gutachter:

Prof. Dr. Wolfgang Büscher

3. Zusätzliches Mitglied der Prüfungskommission:

Prof. Dr. Frank Beneke

## I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis .....	3
II.	Abbildungsverzeichnis .....	6
III.	Tabellenverzeichnis .....	8
1	Einleitung .....	9
2	Kenntnisstand .....	11
2.1	Klima .....	11
2.2	Stoffwechsel, physiologische und morphologische Eigenschaften ...	12
2.3	Beurteilung des Stallklimas .....	14
2.4	Stallklima.....	16
2.4.1	Stalllufttemperaturen in der Schweinehaltung.....	16
2.4.2	Relative Stallluftfeuchte in der Schweinehaltung .....	18
2.4.3	Ammoniak- und Feinstaubbelastung.....	19
2.4.4	Luftgeschwindigkeiten.....	21
2.5	Möglichkeiten zur Reduzierung von Hitzestress in Haltungssystemen von Schweinen .....	21
2.5.1	Evaporation.....	23
2.5.2	Adiabatische Zuluftkonditionierung .....	23
2.5.3	Erdwärmetauscher.....	26
3	Material und Methode .....	27
3.1	Technikversuch.....	27
3.1.1	Methode.....	29
3.1.2	Datenanalyse (Technik- und Praxisversuch).....	30
3.1.3	Statistische Auswertung.....	32
3.2	Praxisversuch .....	33
3.2.1	Betriebsbeschreibung .....	33

3.2.2	Aufbau des Moduls .....	34
3.2.3	Messtechnik .....	35
3.2.4	Statistische Auswertung.....	36
3.2.5	Tierbeurteilung .....	38
3.2.6	Vorversuche zur Bestimmung der Ammoniak- und Feinstaubkonzentration.....	40
3.2.7	Statistische Auswertung.....	41
4	Ergebnisse und Diskussion.....	42
4.1	Technikumsversuch .....	42
4.1.1	Klima .....	42
4.1.2	Einfluss der adiabatischen Zustandsänderung bei Ziegellochsteinen auf die Temperaturdifferenz .....	43
4.2	Einfluss verschiedener Oberflächen auf die adiabatische Zustandsänderung .....	50
4.3	Praxisversuch .....	56
4.3.1	Wetteraufzeichnungen der Wetterstation .....	56
4.3.2	Ergebnisse aus dem Modul.....	56
4.3.3	Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit .....	57
4.3.4	Befeuchtungsgrad.....	61
4.3.5	Enthalpie .....	62
4.3.6	Kühlleistung .....	64
4.3.7	Betrachtung des Stallklimas.....	66
4.4	Einfluss einer Zuluftkonditionierung im Abferkelstall auf das Stallklima während der Säugezeit .....	69
4.4.1	Temperatur-Luftfeuchtigkeitsindex.....	70
4.4.2	Beurteilung der Ferkelgewichte.....	72
4.4.3	Auswertung des Sauenplaners .....	74

4.4.4	Luftvolumenstrom .....	76
4.4.5	Vorversuche zur Feinstaubkonzentration.....	77
4.4.6	Vorversuche zur Ammoniakkonzentration .....	79
5	Bewertung der eigenen Vorgehensweise und des Versuchsdesigns.....	81
5.1	Technikumsversuch .....	81
5.2	Praxisversuch .....	81
5.3	Schlussfolgerungen für die praktische Anwendung .....	83
6	Zusammenfassung .....	84
7	Summary.....	86
8	Literatur.....	88
9	Danksagung.....	113
10	Eidesstattliche Erklärung.....	114
11	Anhang .....	115

## II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Durchschnittliche maximale Jahreslufttemperatur (rot) in Göttingen .....	11
Abbildung 2:	Durchschnittlicher Jahresverlauf der maximalen und minimalen Lufttemperaturen.....	12
Abbildung 3:	Einfluss und Freisetzung von Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) im Schweinestall .....	19
Abbildung 4:	Übersicht von Kühlmöglichkeiten .....	22
Abbildung 5:	Innenansicht des Technikmoduls zur Zuluftkonditionierung.....	27
Abbildung 6:	Außenansicht der Technikmodule.....	27
Abbildung 7:	Übersicht der Messpunkte .....	33
Abbildung 8:	Außenansicht des Moduls.....	34
Abbildung 9:	Querschnitt des Moduls .....	34
Abbildung 10:	Messstellen zur Luftkeimuntersuchung.....	40
Abbildung 11:	Durchschnittlicher Tagesverlauf der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit .....	42
Abbildung 12:	Einfluss der Austauschoberfläche von Ziegellochsteinen auf die Temperaturdifferenz ( $\Delta K$ ) .....	43
Abbildung 13:	Einfluss von Steinreihen und Luftvolumenstrom auf die Temperaturdifferenz.....	44
Abbildung 14:	Einfluss von Steinreihen und Luftvolumenstrom auf den Befeuchtungsgrad.....	45
Abbildung 15:	Einfluss von Steinreihen und Luftvolumenstrom auf die Kühlleistung. ....	47
Abbildung 16:	Einfluss von Steinreihen und Luftvolumenstrom auf die Druckdifferenz.....	48
Abbildung 17:	Einfluss des Luftvolumenstroms sowie Anzahl an Steinreihen (A, B, C, D) auf die Temperaturdifferenz.....	49

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 18:	Einfluss der Austauschoberfläche auf die Temperaturdifferenz .....	50
Abbildung 19:	Einfluss der Austauschoberfläche auf den Befeuchtungsgrad .....	51
Abbildung 20:	Einfluss der Austauschoberfläche auf die Kühlleistung .....	53
Abbildung 21:	Einfluss der Austauschoberfläche auf die Druckdifferenz .....	54
Abbildung 22:	Einfluss der Austauschoberfläche auf die Temperaturdifferenz in Abhängigkeit von der Enthalpie .....	55
Abbildung 23:	Lsmeans der Temperatur- und relative Luftfeuchtdifferenz .....	57
Abbildung 24:	Temperaturverlauf der Außenluft und der konditionierten Luft .....	59
Abbildung 25:	Zusammenhang des Befeuchtungsgrades auf die Temperaturdifferenz .....	61
Abbildung 26:	Einfluss von Temperaturdifferenz, Luftgeschwindigkeit und Massenstrom Wasser .....	63
Abbildung 27:	Zusammenhang von Kühlleistung und Temperaturdifferenz .....	65
Abbildung 28:	Lsmeans für die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit .....	66
Abbildung 29:	Messreihen vom Temperaturverläufen .....	67
Abbildung 30:	Wärmebild .....	69
Abbildung 31:	Temperatur humidity Index (THI) .....	70
Abbildung 32:	Temperatur humidity Index (THI) .....	71
Abbildung 33:	Lsmeans der Ferkelgewichte am 20. Zyklustag .....	72
Abbildung 34:	Lsmeans für den Volumenstrom in $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ .....	76
Abbildung 35:	Tagesmittelwerte der Ammoniakkonzentration ( $\text{NH}_3$ ) .....	79

### III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der verwendeten Materialien,.....	28
Tabelle 2:	Variantenplan für den Untersuchungszeitraum .....	29
Tabelle 3:	Übersicht der Versuchszeiträume im Praxisversuch .....	36
Tabelle 4:	Übersicht der Abferkeldurchgänge.....	38
Tabelle 5:	Beurteilung des Temperature-Humidity-Index (THI).....	39
Tabelle 6:	Lsmeans der lebendgeborenen und abgesetzten Ferkel / Sau und Wurf .....	74
Tabelle 7:	Ferkelverluste während des Untersuchungszeitraumes.....	75
Tabelle 8:	Luftkeimuntersuchung.....	77
Tabelle 9:	Luftkeim- und Wasseruntersuchung .....	78



### 1 Einleitung

Ein optimales Stallklima ist bei der Haltung von Schweinen Grundvoraussetzung für die Gewährleistung des Tierwohls. Die Temperaturen sowie die relativen Feuchten der Stallluft sollten daher an die Bedürfnisse der Schweine optimiert sein. Hitzewellen, große Schwankungen der Stalllufttemperatur und relativen Stallluftfeuchten, hohe Schadgaskonzentrationen ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{S}$ ) sowie Keim- und Staubanteile in der Stallluft beeinträchtigen die Tiere und führen zu einer reduzierten Leistung und Futteraufnahme, die mit einer reduzierten Gesundheit einhergehen kann (VAN CAENEGEM und DEGLIN 1997; COLLIN et al. 2001; IRGANG 2001; GRAMATTE 2009; SADA und REPPPO 2009; RENAUDEAU et al. 2012). Die Leistungssteigerung der Schweine und damit erhöhte Stoffwechselforgänge (PURWANTO et al. 1990; CLAUSS und CLAUSS 2007; BÜSCHER et al. 2008), als auch die Klimaveränderung und die damit zu erwartende Erwärmung der Außentemperatur (RAHMSTORF 2003; LEUSCHNER und SCHIPKA 2004; ANONYM 2007; KOVATS et al. 2014; MEINKE et al. 2014), sind ebenfalls zu berücksichtigen. Diese Einflüsse können beim Schwein zu Hitzestress führen und sind daher zu vermeiden (MCGLONE et al. 1988a). Nach SAMER et al. (2011) ist damit zu rechnen, dass die Anforderungen an die Lüftungstechnik in Tierproduktionssystemen weiterhin steigen werden. Dabei reicht es nicht aus mit hoher Geschwindigkeit mehr Luftvolumenstrom an die Tiere zu fördern um Hitzewellen zu minimieren (BARBARI und CONTI 2009). Eine mögliche Lösung hohe Stallinnentemperaturen zu minimieren sind Kühltechnologien, die mit Hilfe von Verdunstungssystemen arbeiten (HAEUSSERMANN et al. 2007a; MILLER et al. 2010; SAMER et al. 2012; SAMER 2013). Da Wasserverdunstung Wärmeenergie benötigt, die aus der behandelten Luft absorbiert wird, sinkt die Temperatur der behandelten Luft (SAMER et al. 2015). Dieses Prinzip hat aufgrund seiner Einfachheit bei Verwendung von natürlichen Ressourcen (Wasser) in der Klimatechnologie zugenommen (CHEN et al. 2010; CHEN et al. 2011). Diese Arten von Kühlsystemen sind an heißen und trockenen Tagen sehr effektiv und können somit die Innenlufttemperatur in Nutztierställen verringern (LIAO und CHIU 2002; WANG et al. 2008). Aus zahlreichen Studien geht hervor, dass die so genannte Verdunstungsbefeuchtung, auch Evaporative Cooling oder adiabatische Zuluftkonditionierung genannt, mit möglichen Temperatursenkungen bis zu 8 K als höchst effektiv anzusetzen ist (GATES et al. 1991; PANAGAKIS und AXAPOULOS 2006; DAĞTEKIN et al. 2009a; RENAUDEAU et al. 2012;

PERTAGNOL 2013; HEIDENREICH 2015). Die Effektivität des Systems der adiabatischen Zuluftkonditionierung sinkt mit zunehmender relativer Luftfeuchte der Zuluft, aufgrund der begrenzten Wasseraufnahmefähigkeit der Luft (LUCAS et al. 2000; BUCKLIN et al. 2009; DAĞTEKIN et al. 2009a). In der Praxis bereits bewährte Lösungen basieren meistens auf Cellulose- bzw. Kunststoffpads (KOCA et al. 1991). Diese Materialien sind teuer in der Anschaffung und aufwendig herzustellen (LIAO und CHIU 2002). In einer Studie von CIELEJEWSKI (2010) wird auf das Kühlpotential von Ziegellochsteinen bei einer adiabatischen Zuluftkonditionierung hingewiesen. Die Untersuchungen zeigen im Durchschnitt eine Abkühlung der Außentemperatur von 4 K sowie eine gesamteinheitliche Reduzierung der Temperaturamplitude. Perfektionierte Bauweise und optimale Wärmeleitfähigkeit von Ziegellochsteinen, wie bei BRAMESHUBER et al. (2011) beschrieben, lassen die Vermutung zu, dass dieses Material großes Potenzial für Kühlmöglichkeiten besitzt. Untersuchungen zur Dimension für ein Modul zur Kühlung von Nutztierställen mit Ziegellochsteinen liegen derzeit jedoch nicht vor.

Ziel des Technikumsversuchs ist es, die Variation von Luftvolumenströmen und Ziegellochsteinen auf die Kühlleistung von Zuluft und konditionierter Abluft unter standardisierten Bedingungen zu analysieren. Zu klären ist, wie das System auf die Einflüsse von adiabatischer Befeuchtung, Druckdifferenz, Temperatur sowie relative Luftfeuchtigkeit reagiert. Die Ergebnisse dienen dann als Grundlage für die Konstruktion eines nachrüstbaren Moduls an Schweineställen.

Im Praxisversuch ist das Ziel, ein für neue als auch bestehende Ställe nachrüstbares Modul zu entwickeln, mit dem die Zuluft so konditioniert wird, dass sowohl die hohe Zulufttemperaturen im Sommer als auch die hohen Lufttemperaturschwankungen im Tagesverlauf reduziert werden. Durch die möglichen positiven Effekte einer Zuluftkonditionierung werden weniger Verluste und höhere Absatzgewichte bei den Ferkeln sowie eine Reduzierung des Temperature-Humidity Index (THI) im Versuchsabteil erwartet.

## 2 Kenntnisstand

### 2.1 Klima

Die Folgen des Klimawandels wirken sich in Zukunft deutlich stärker aus. Die langfristigen Entwicklungstendenzen in der europäischen Landwirtschaft werden laut Szenarien der Klimaforschung maßgeblich durch veränderte Witterungsbedingungen beeinflusst. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen einer Entwicklung hin zu trockenheißen Bedingungen mit ungefähr 2-4 °C höheren Jahresmitteltemperaturen und Sommertrockenheit im Laufe der nächsten 60 Jahre und einer Zunahme von Witterungsschwankungen (HENNEGRIFF et al. 2006; CHRISTEN 2008). Für diese Entwicklungen ist eine große Anzahl von Einflussfaktoren verantwortlich, die an dieser Stelle nicht ausführlich dargestellt werden können. Die Abbildung 1 veranschaulicht, repräsentativ für Göttingen, den Trend der durchschnittlichen maximalen Temperatur. Daraus ersichtlich ist mit einer Zunahme von über 1 °C der Lufttemperatur in den Jahren 1990 bis 2024 zu rechnen (DEUTSCHER WETTERDIENST 2016).

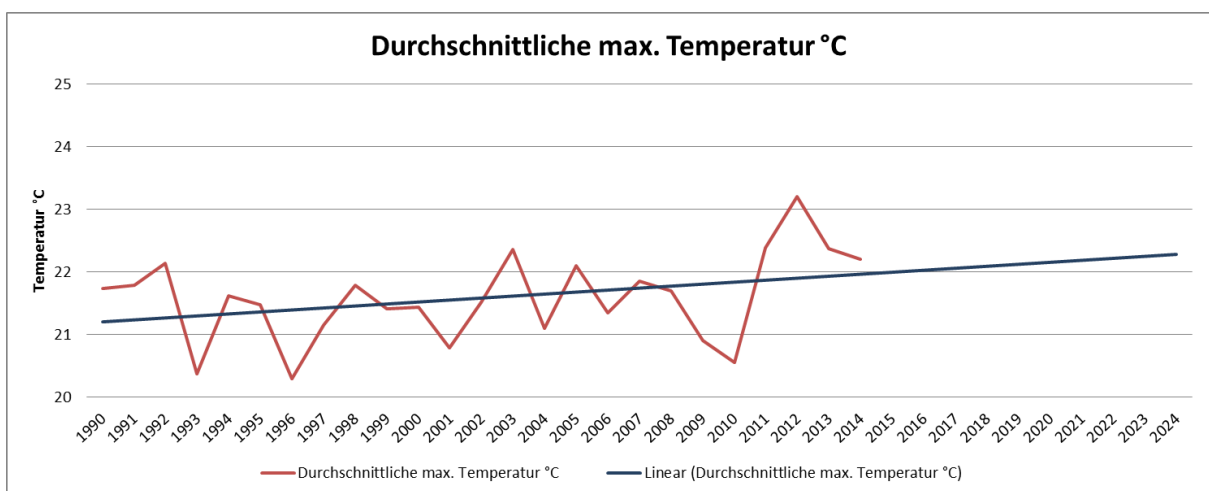


Abbildung 1: Durchschnittliche maximale Jahreslufttemperatur (rot) in Göttingen von 1990 bis 2014 und Trendlinie (schwarz) bis 2024. Daten der Messstation Göttingen (DWD, 2016).

Die Regionen Deutschlands werden unterschiedlich stark vom Klimawandel betroffen sein. So sind beispielsweise Ballungsgebiete in Ostdeutschland und dem Rheintal durch Hitzewellen besonders gefährdet. Hier kann bis zur Mitte des Jahrhunderts die Anzahl der heißen Tage pro Jahr auf 15 bis 25 Tage ansteigen. Heute gibt es 8 bis 12 solcher Tage mit einem Tagesmaximum der Lufttemperatur von mindestens 30 °C (HENNEGRIFF et al. 2006; EITZINGER 2009). Die Abbildung 2 präsentiert aus den Messdaten der Jahre 2004 bis 2014 einen durchschnittlichen Jahresverlauf in Göttingen.

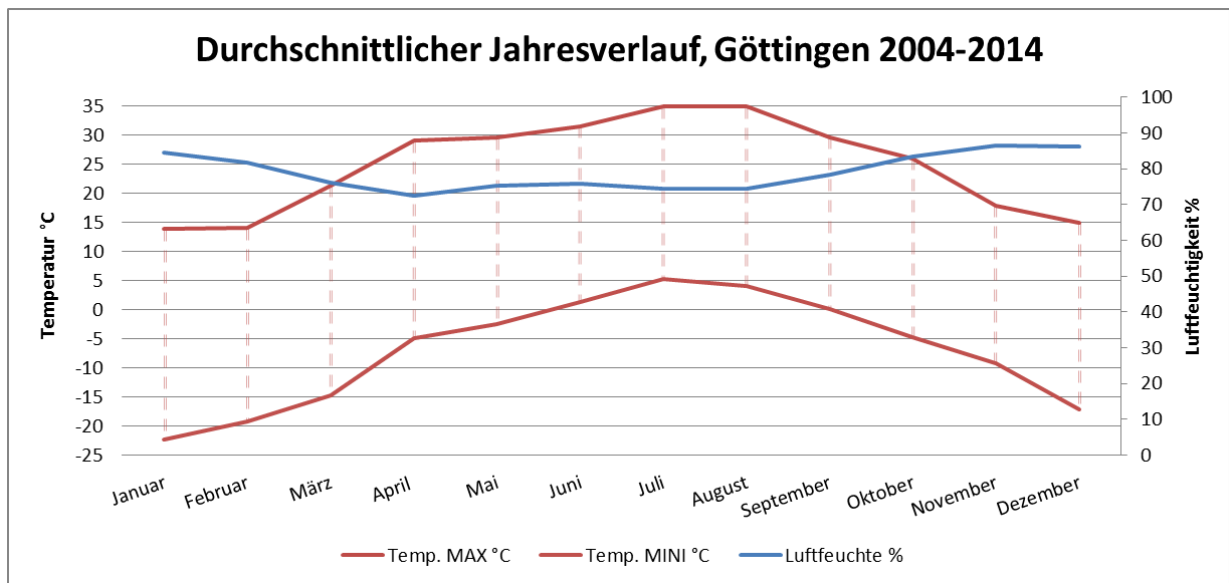


Abbildung 2: Durchschnittlicher Jahresverlauf der maximalen und minimalen Lufttemperaturen sowie der relativen Luftfeuchtigkeit in Göttingen aus den Messdaten von 2004-2014 (DWD, 2016).

Die klimawandelbedingte Temperaturerhöhung wird nach Ansicht von HENNEGRIFF et al. (2006) zu einem bedeutenden Mehrbedarf an Kühlung in der Landwirtschaft führen. Dies gilt besonders für die Tierhaltung, weil die Gesundheit und das Wohlbefinden der Tiere unmittelbar von der Temperatur abhängen (WEBER 2003). Unter der Berücksichtigung, dass als wesentliche Ursache für den Temperaturanstieg menschengemachte Ursachen, wie Treibhausgase, Kohlenstoffdioxid, Lachgas und Methan eine zentrale Rolle spielen (KUHLMANN 2021), sind die kontroversen Diskussionen zum Umwelt- und Tierschutz als große Herausforderung zu sehen (HEILAND et al. 2005).

## 2.2 Stoffwechsel, physiologische und morphologische Eigenschaften

Schweine sind homoiotherme Tiere, das heißt sie halten ihre Körpertemperatur konstant, solange die Stalllufttemperatur bestimmte Grenzen nicht über- oder unterschreitet (RUDOVSKY 2004; JUNGBLUTH et al. 2005; BUSCH und SCHLENKER 2010). In der Mastschweinehaltung im wärmegeprägten Stall ist Kältestress kein Thema, dagegen ist Hitzestress problematisch (BIANCA 1971). Innerhalb der Zone thermischer Neutralität ist die metabolische Wärmeproduktion unbeeinflusst von einer Änderung der Umgebungstemperatur (HOLMES and CLOSE 1985). MONTEITH (1974) und MOUNT (1974) bezeichnet diese Zone auch als geringsten thermoregulatorischen Aufwand. Jede Temperaturerhöhung oberhalb dieses Bereiches bedeutet für das Tier,

Hitzestress. Die sensible Wärmeabgabe ist dann erschwert. Das Tier leidet unter Hyperthermie und läuft Gefahr am Hitzetod zu sterben (YOUSSEF 1985). Die Anhebung der Atemfrequenz ist die erste Anpassung an erhöhte Umgebungstemperaturen (BROWN-BRANDL et al. 2001). Auch die Abgabe von Wärme durch Evaporation im oberen Teil des Respirationstraktes (Rüsselscheibe), verbunden mit der Erhöhung der Atemfrequenz, ist einer der ersten physiologischen Anpassungsmechanismen (MOUNT 1979). Die Atemfrequenz kann bei extrem hohen und andauernden Temperaturen von 30 Atemzüge/min auf >240 Atemzüge/min ansteigen (SERRES 1992; BROWN-BRANDL et al. 1998). Eine Erhöhung der Wasseraufnahme und die Reduktion der Futteraufnahme wird dabei festgestellt (HUYNH et al. 2005). Nach VAN PUTTEN (1978) nutzen die Tiere vornehmlich das Wälzen auf feuchten sowie kühlen Plätzen zur Thermoregulation. Auch die Verengung (Vasokonstriktion) oder Erweiterung (Vasodilation) der feinen Blutgefäße in der Nähe der Oberfläche beim Schwein führen zu einer Temperaturanpassung. BOGNER und ANDREAE (1984), PENZLIN und BEINBRECH (2005) sowie LOEFFLER und GÄBEL (2009) stellten fest, dass die Schweine aufgrund des Körperbaus erhebliche Problemen bei der Abgabe von überschüssiger Wärme haben. Dies läge zum einen an einem fast gänzlichen Fehlen von Schweißdrüsen und zum anderen an einer gut ausgeprägten subkutanen Fettschicht, welche die Wärmeabgabe erschwert. Eine Adaptionsreaktion ist immer mit Energieaufwendungen und folgenden Leistungseinbußen verbunden, die wiederum wirtschaftliche Verluste nach sich ziehen (MOUNT 1968). Daher sollte versucht werden, Anpassungsreaktionen auf ein Minimum zu reduzieren. Die Auffassung, dass gute oder hohe Leistung für gutes Wohlbefinden spricht, wird heutzutage nur noch selten vertreten. Hohe Leistung muss nicht unbedingt hohes Wohlbefinden implizieren, wohingegen Leistungseinbrüche mit vermindertem Wohlbefinden einhergehen (SUNDRUM 1994). Erst in neuerer Zeit werden die endokrinen Mechanismen spezifischer Stressoren auf Futteraufnahme und Wachstum näher untersucht (MATTERI et al. 2000). Stress kann sich indirekt anhand der Leistung widerspiegeln (EKKEL et al. 1995). Extreme Klimabedingungen können beispielsweise zu einer Minderung des Wohlbefindens von Schweinen führen. Einen Hinweis kann die Futteraufnahme und Futtermittelverwertung (RENAUDEAU et al. 2006a; RENAUDEAU et al. 2006b) sowie erhöhter Glucosegehalt (STEINBACH 1987) im Blut geben. Ein Schwein passt die Futteraufnahme der herrschenden Umgebungstemperatur an: Bei niedrigen Temperaturen wird mehr, bei

hohen Temperaturen weniger Futter aufgenommen (RENAUDEAU et al. 2006b; RENAUDEAU et al. 2006a; ANDRESEN and REDBO 1999). Diese Regulation nutzen die Tiere um zusätzliche Verdauungswärme zu vermeiden (NIENABER et al. 1987; BÜSCHER et al. 2002). In der Ferkelerzeugung sind ebenfalls Reproduktionseinbrüche festzustellen (KLEIN-TANK und KÖNNEN 2003; PRANGE 2004). So wurden pro 1 K oberhalb von optimalen Stalllufttemperaturen Rückgänge in der Futteraufnahme von 0,65 MJ/ Tag belegt (CLOSE 1989). LE L. BELLEGO et al. (2002) registrierten bei einem Temperaturanstieg von 22 auf 29 °C einen Rückgang der Futteraufnahme um 15 %. Weitere Untersuchungen von COLLIN et al. (2001), KERR et al. (2003) und RENAUDEAU et al. (2008) konnten ebenfalls negative Effekte zwischen Temperaturanstieg und Futtermittelverwertung beobachten. Schweine verringern ihre Futteraufnahme in dem sie die Mahlzeiten verkürzen, die Anzahl der Mahlzeiten bleibt in etwa gleich (COLLIN et al. 2001). Je schwerer die Tiere bereits sind, desto ausgeprägter ist der Effekt (QUINIOU und NOBLET 1999). An dieser Stelle ist auf den Zusammenhang zwischen Rations- und Klimagestaltung kurz hinzuweisen. Eine Senkung des Rohproteingehalts, bei Ergänzung der essentiellen Aminosäuren, führt zu einer optimalen Verwertung der Ration. Durch diesen Effekt wird weniger Wärme frei (KERR et al. 2003; BROWN-BRANDL et al. 2004) und die Tiere von Hitzestress entlastet (LE L. BELLEGO et al. 2002). Auch bei den Schlachtleistungsmerkmalen können vor allem Abweichungen in der Entwicklung von pH-Werten und Leitfähigkeit sowie das Auftreten von Fleischqualitätsmängeln PSE (blass, weich, wässrig) und DFD (dunkel, fest, trocken) im Nachhinein einen Hinweis auf erhöhten Stress geben (GREGORY und TEMPLE GRANDIN 1998). Nach Untersuchungen von DAUNCEY and INGRAM (1983), KOUBA et al. (2001) sowie DAUNCEY and INGRAM (1983) ist der Fettanteil im Körper eines länger hohen Temperaturen ausgesetzten Schweins geringfügig höher. Die Verteilung des Fettes im Körper verlagert sich aus dem Rückenspeck in Organfett und Flomen (DEMO et al. 1995). Demzufolge stieg der Magerfleischanteil des Schlachtkörpers eines hitzestressierten Tieres an (LE L. BELLEGO et al. 2002).

### **2.3 Beurteilung des Stallklimas**

Nicht nur tierbezogene Beurteilungsparameter spielen bei der Bewertung von Haltungssystemen eine Rolle. Stallbezogene Beurteilungsparameter, wie z.B. das Stallklima, können erklärend und ergänzend herangezogen werden, um die

Tiergerechtheit eines Systems zu bewerten. Das Stallklima beeinflusst wesentlich das Verhalten, und kann chemisch-physikalisch durch eine Reihe von messbaren Parametern umschrieben werden (VAN CAENEGEM und WECHSLER 2000):

- Temperatur der Stallluft
- Feuchte der Stallluft
- Luftbewegung
- Schadgase
- Staub- und Keimkonzentrationen
- Beleuchtung
- Lärmpegel

Nach VAN CAENEGEM und WECHSLER (2000) müssen verschiedene Faktoren, wie z.B. das Alter der Tiere, die Art des Haltungssystems sowie Intensität und Dauer der Einwirkung eines Stallklimafaktors berücksichtigt werden, um im Einzelfall den Einfluss des Stallklimas auf die Tiere einschätzen zu können. Auch sind die einzelnen Parameter nicht alleine, sondern in Kombination mit anderen Stallklimafaktoren zu betrachten. Dies macht es schwierig, für einzelne Stallklimafaktoren tierartspezifische Grenzwerte anzugeben. Auf die einzelnen Stallklimakomponenten wird im Folgenden näher eingegangen.

Eine Beschreibung von Haltungssystemen anhand technischer Indikatoren kann folglich Schwachstellen aufdecken (ANDERSSON 1998). Detaillierte Listen technischer Indikatoren auf der Grundlage rechtlicher Vorschriften, Erfahrungen und Empfehlungen aus Praxis und Wissenschaft finden sich bei BOCKISCH et al. (1999) sowie bei BARTUSSEK (1999), die sogenannte Tiergerechtheitsindices entwickelt haben. Die Gewichtung und Beurteilung (Punktevergabe, Grenzwerte etc.) von Einzelfaktoren integrierender Systeme ist umstritten und wird viel diskutiert (BARTUSSEK 1999). Während in der Praxis schnell einsetzbare Beurteilungssysteme zum Vergleich von Haltungssystemen genutzt werden, die nur eine punktuelle Situation erfassen können, sollten für die Schätzung des Wohlbefindens der Tiere in einem Haltungssystem unbedingt längerfristige Auswirkungen auf die Tiere Berücksichtigung finden. Für die technischen Indikatoren gilt darüber hinaus, dass angegebene Referenzbereiche offen bleiben müssen für neue Erkenntnisse mit dem Ziel, dass das Tier in der jeweiligen Haltungsumgebung arttypische Verhaltensweisen

ausführen kann (BOCKISCH et al. 1999). In Deutschland werden 92 % der Schweine in Haltungsverfahren mit Voll- und Teilspaltenböden gehalten (ROHLMANN et al. 2021). Die Akzeptanz dieser Haltungsform nimmt jedoch mit Tierhaltungsintensivität ab. Ein Innovationsnetzwerk „Stall der Zukunft“ soll definieren wie Ökonomie und Ökologie sowie die gesellschaftliche Akzeptanz ins Gleichgewicht geführt werden können. Erste Ergebnisse zeigen, dass Außenklimaställe im Vergleich zu zwangsbelüfteten Ställen nicht als emissionsarm darzustellen sind. Einige Haltungsverfahren, die unter Tierwohlaspekten erwünscht sind, können zu erhöhten Emissionen und insbesondere auch zu erhöhten Immissionsbelastungen im Nahbereich der Anlagen führen (MAISACK und FELDE 2019; HAHNE 2021).

## **2.4 Stallklima**

### **2.4.1 Stalllufttemperaturen in der Schweinehaltung**

Ein optimales Stallklima ist bei der Haltung von Schweinen Grundvoraussetzung für die Gewährung des Tierwohls und für den wirtschaftlichen Erfolg. In Bezug auf die Stallluft bedeutet dies, dass die Temperaturen sowie die relativen Feuchten den Ansprüchen der Tiere angepasst sein sollten. Schlechte Stallluftqualitäten führen zu einer Beeinträchtigung der Stallhygiene und des Tierwohls (VAN CAENEGEM und DEGLIN 1997). Die Auswirkungen der Umgebung (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit) auf die Schweineleistung sind schon früh erforscht worden und zeigen einen wichtigen Schritt zu wirksamen Umweltregulierungen in Stallanlagen (HEITMAN und HUGHES 1949; HEITMAN et al. 1958; BOND et al. 1963; GUNNARSON et al. 1967). BROWN-BRANDL et al. (2004) merken an, dass Vorgaben für Stallbauten und Lüftungskonzepte sowie die Fütterung laufend zu überarbeiten und dem Tiermaterial anzupassen sind. Insbesondere zu hohe Stalllufttemperaturen, große Schwankungen der Stalllufttemperatur und der relativen Stallluftfeuchten, hohe Schadgaskonzentrationen ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{S}$ ) sowie Keim- und Staubanteile in der Stallluft beeinträchtigen die Tiere, und führen zu reduzierter Leistung, die mit einer reduzierten Gesundheit einhergehen kann (KÖFER et al. 1993; PLONAIT und BICKHARDT 1997; VAN CAENEGEM und DEGLIN 1997; HÖRNING 1999; IRGANG 2001; RUDOVSKY 2004).



In der Mastschweinehaltung sind die täglichen Zunahmen, die Futtermittelverwertung und die Mastdauer zentrale Erfolgskennzahlen, die von der täglichen Futteraufnahme des Einzeltieres und damit auch von dessen Konstitution und den herrschenden Umweltbedingungen abhängen. Die Veränderungen in der Wachstumsgeschwindigkeit in Folge der Zucht sind in den letzten Jahren stark geprägt. HOY et al. (2006) empfiehlt für ein Schwein von 40-50 kg eine Temperatur von durchschnittlich 18 °C. PRANGE (2004) und HEITMAN et al. (1958) publizieren, dass die optimale Lufttemperatur im Mastschweinestall 24-16 °C betragen sollte, wobei die Lufttemperatur mit zunehmendem Alter der Tiere vom höheren auf den niedrigeren Wert gesenkt werden sollte. Diese Angaben decken sich in etwa mit den Angaben der DIN-Norm 18910, „Wärmeschutz geschlossener Ställe – Wärmedämmung und Lüftung-, Planungs- und Berechnungsgrundlagen“ (AEL 2007). Die Anforderungen der Lüftungstechnik sind bei Schweinen im Abferkelstall besonders hoch. Dort müssen zwei Klimazonen reguliert werden. Zum einen der Bereich um die Sau herum bei Temperaturen von 16-22 °C, zum anderen der Bereich der Ferkel mit 30-32 °C (BLACK et al. 1993; PRUNIER et al. 1997; QUINIOU und NOBLET 1999; RENAUDEAU et al. 2003). Die Geburtsphase der Ferkel ist ein Stressfaktor für die Sau, und dieser empfindliche Zeitabschnitt kann mehrere Stunden anhalten. Parallel dazu ist der Energiebedarf an Wärme für die Ferkel in den ersten Lebenstagen am höchsten (DOLZ et al. 2015). Eine Erhöhung der Umgebungstemperatur im Abferkelstall von 18 auf 28 °C reduzierte die Milchleistung um 25 % und die Futteraufnahme um 40 % (BLACK et al. 1993). Auch QUINIOU und NOBLET (1999) kommen zu der Erkenntnis, dass Temperaturen über 25 °C für laktierende Sauen als kritisch für den Erhalt der Leistungsfähigkeit zu sehen sind. Für das Tier problematisch sind ebenfalls die großen Schwankungen in der Lufttemperatur (Atemwegserkrankungen). Der Organismus des Tieres kann sich nicht schnell genug anpassen (RENAUDEAU et al. 2006b). Moderate Schwankungen im Bereich von 5-8 K bereiten den Tieren keine Probleme, wenn keine weiteren negativen Einflüsse (z. B. Nässe, Krankheit) herrschen (MORRISON et al. 1975; HAHN et al. 1987). Gemäß MEYER (2012) wäre es wünschenswert, die Schwankungen der Tag- / Nachttemperatur, im Hinblick auf die Vermeidung von Verhaltensstörungen, auf 3 K zu beschränken. Herrschen größere Schwankungen von > 12 °C sind die Zuwachsraten geringer (NIENABER et al. 1987) sowie die Futteraufnahmen reduziert (LOPEZ et al. 1991). Zudem verlagern die Schweine ihre Mahlzeiten in die kühleren

Temperaturphasen, was aber nicht in jedem Fall für eine Kompensation der gewünschten Futteraufnahme ausreicht, wobei auch die Aufnahmekapazität begrenzend wirkt (QUINIOU et al. 2000; PATIENCE et al. 2005). Bei geringer Wärmeabgabe in heißer Umgebung lässt sich die Wärmeproduktion nicht unter den durch den Erhaltungsumsatz bedingten Wert senken, d.h. bei Hitze bietet die metabolische Wärmeproduktion einen geringeren Spielraum zur Temperaturregulierung und das Wohlbefinden der Schweine ist stärker beeinträchtigt (WITTKE 1972).

### **2.4.2 Relative Stallluftfeuchte in der Schweinehaltung**

Die relative Luftfeuchte bezeichnet den Wasserdampfgehalt in Prozent des maximal möglich enthaltenen Wasserdampfes in der Luft, abhängig von Temperatur- und Druckverhältnissen. Der Gehalt an relativer Luftfeuchte ist eng verbunden mit der Lufttemperatur und daher ebenfalls ein zu beachtender Faktor des Stallklimas, welcher Einfluss auf die Tiere haben kann. Wie sich der Gehalt an der relativen Luftfeuchte der Luft (bei einem Standard-Druck von 0,1 MPa) verändert, indem man sie erwärmt, weiter befeuchtet, entfeuchtet oder kühlt, kann im h, x-Diagramm abgelesen werden (GATES et al. 1991). Nach der DIN-Norm 18910 sollte eine Raumlufffeuchtigkeit im Stall ohne Heizung von 60-80 %, in Ställen mit Heizung von 40-70 % angestrebt werden (AEL 2007). Ein Anstieg der Luftfeuchte über 80 % hat eine Verringerung der Atmungs- und Oberflächenverdunstung zur Folge (JOHNSON und VANJONACK 1976). Beim Schwein ist die evaporative Wärmeabgabe vor allem bei hohen Temperaturen von großer Bedeutung (Hecheln = erhöhte Atemfrequenz). Evaporation kann aber nur stattfinden, wenn die umgebende Luft auch noch in der Lage ist, zusätzlich Feuchte aufzunehmen, also ungesättigt ist (BOGNER 1984). Bei hohen Lufttemperaturen, kombiniert mit hohen relativen Luftfeuchten ist der Stress für die Tiere daher zusätzlich erhöht, da die Feuchteaufnahmekapazität der umgebenden Luft und somit auch die Wärmeabgabe über Evaporation begrenzt ist (HUYNH et al. 2005; RENAUDEAU 2005; GROTE et al. 2006). Untersuchungen zur Auswirkung verschiedener Luftfeuchten auf die Leistung von Schweinen wurden von KAMADA und NOTSUKI (1985) durchgeführt. Sie wiesen keine Leistungsunterschiede zwischen einer herrschenden Raumfeuchte (RF) von 40 % und 70 % bei unterschiedlichen Temperaturen nach, und auch bei Temperaturen innerhalb der thermoneutralen Zone konnte der relativen Luftfeuchte

kein Einfluss nachgewiesen werden (MORRISON et al. 1975; RANDALL 1983). Eine Untersuchung mit Mastschweinen (60-70 kg) führten HUYNH et al. (2005) durch. Sie konnten nachweisen, dass der Gehalt an relativer Luftfeuchte einen direkten und signifikanten Einfluss auf die Atemfrequenz und die Rektaltemperatur der Schweine hat. Auf die anderen Parameter, wie Wärmeproduktion und Futteraufnahme wurde kein Einfluss der relativen Luftfeuchte nachgewiesen. Es wurde gefolgert, dass die relative Luftfeuchte beim Schwein im Zusammenhang mit Temperaturen innerhalb der thermoneutralen Zone keine Rolle spielt; negative Effekte werden durch die Kombination hoher Temperatur mit hoher relativer Luftfeuchte induziert (HUYNH et al. 2005). Um den Effekt der Temperatur und Luftfeuchte zusammen zu betrachten, wurde der THI, (Gleichung 14) eingeführt (THOM 1959; HAEUSSERMANN et al. 2007b; NWSCR 2014).

### 2.4.3 Ammoniak- und Feinstaubbelastung

Die Ammoniakkonzentration aus Tierhaltungen ist ein weltweiter Forschungsschwerpunkt, da Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) eine Belastung für die äußere Umwelt darstellt (FERM 1998; SOUSA DE und PEDERSEN 2004). Die Schweinehaltung in Deutschland hat dabei einen wesentlichen Einfluss auf die  $\text{NH}_3$ -Konzentration. Eine Übersicht zu den Entstehungsquellen ist in der Abbildung 3 dargestellt.

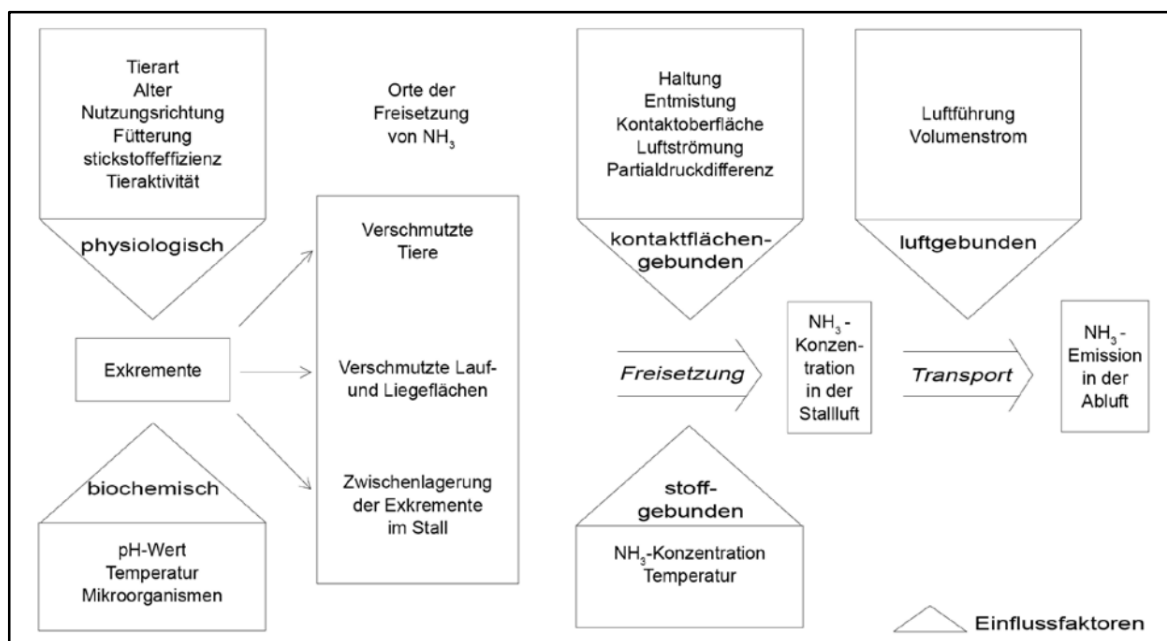


Abbildung 3: Einfluss und Freisetzung von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) im Schweinestall (KECK et al. 1995).

Das Stallklima hat dabei die meisten Effekte auf die Entstehung (KECK et al. 1995; GALLMANN 2003; MEISSNER 2004). In Untersuchungen von BEYERSDORFER und GERMAND (2012) geht hervor, dass eine Zuluftabkühlung von 6 K bei steigender Luftfeuchtigkeit eine Reduzierung der  $\text{NH}_3$ -Konzentration bewirkt. Auch in den Untersuchungen von SOUSA DE und PEDERSEN (2004) zeigt eine Reduzierung der Stalltemperatur und der Abluftrate im Schweinestall eine Minderung der  $\text{NH}_3$ -Konzentration. In der Veröffentlichung von MÜLLER et al. (2005) wird beim Einsatz eines Erdwärmetauschers eine Reduzierung der  $\text{NH}_3$ -Konzentration von bis zu 25 % im Jahr festgestellt. Ähnliche Ergebnisse finden sich auch in den Untersuchungen von (ANDERSSON 1998). STANDKE und BÜSCHER (2011) fügen hinzu, dass die Anforderungen an Stallsysteme mit Senkung der Emissionsgehalte verschärft werden. Nach Untersuchungen von CABARAUX et al. (2009) werden diese Senkungen nicht eingehalten, wenn die Tiere auf Stroh gehalten werden. Es wurde festgestellt, dass sich die  $\text{NH}_3$ -Konzentration in der Variante mit Stroh gegenüber Vollspaltenböden annähernd verdoppeln.

Neben Ammoniak werden in der Tierproduktion auch Gerüche und Feinstäube mit biologischen Komponenten freigesetzt. Da Ammoniak- und Feinstaubkonzentration teilweise aus denselben Aktivitäten stammen, können Wechselwirkungen zwischen der Verringerung der Ammoniak- und Feinstaubkonzentration und den Treibhausgasemissionen bestehen (KRUPA 2003; WAGNER et al. 2015). Zusätzliche Studien weisen darauf hin, dass durch Reduzierung von Schadgasen die Gesamtkosten in der Schweinehaltung gesenkt werden können (BRINK et al. 2005; EORY et al. 2013). Partikelförmige Luftverunreinigungen in Stallungen führen in nicht unerheblichem Maße zu gesundheitlichen Gefahren für Menschen und Tiere im Stall. Über die Lüftungsanlagen werden die Stäube, die Staubbestandteile und Mikroorganismen an die Umgebung abgegeben (SEEDORF 2002; WAGNER et al. 2015). Biologische Aerosole sind z.B. Bakterien, Viren, Pilzsporen, Blütenstaub, Wurmeier, usw. die durch anheften an Flüssigkeitstropfen oder Staubteilchen weiter transportiert werden. In der Veterinärmedizin sind vor allem Aerosole von Bedeutung, die Bakterien, Viren oder pathogene Pilze enthalten (JARNYCH et al. 1976; ROLLE et al. 1984).

#### **2.4.4 Luftgeschwindigkeiten**

Sobald eine Luftbewegung von  $> 0,1 \text{ m s}^{-1}$  vorliegt, wird nach HOY et al. (2006) von Luftgeschwindigkeiten gesprochen. Schweine reagieren sehr empfindlich auf Zugluft (MOUNT und INGRAM 1965; INGRAM und LEGGE 1969). Die Luftbewegung kann mit Hilfe von Theaternebel oder Wärmebildkameras sichtbar gemacht werden. Der Optimalbereich der Luftgeschwindigkeit soll hierbei zwischen  $0,2 \text{ m s}^{-1}$  und max.  $0,6 \text{ m s}^{-1}$  bei idealer Stalllufttemperatur sein (PRANGE 2004). Die Luftbewegung beeinflusst wesentlich die Fähigkeit des Organismus, bei Hitze Wärme abzugeben bzw. bei Kälte die Körperkerntemperatur konstant halten zu können. Hohe Luftgeschwindigkeiten haben somit eine zweifache Wirkung, sie erhöhen zum einen den Wärmeübergang pro Grad Temperaturdifferenz zwischen Tieroberfläche und Luft, zum anderen verringern sie die Wärmedämmung durch Zerstörung des schützenden Luftfilms im Haarkleid (VAN CAENEGEM und WECHSLER 2000). Im Sommer kann eine hohe Luftbewegung eine Möglichkeit zur Abkühlung durch Vermeidung von Wärmestau sein. Im Winter kann es aber durch zu hohe Luftgeschwindigkeit zu Wärmeverlusten kommen. Die Abkühlung durch Luftbewegung bei gleicher Lufttemperatur ist direkt proportional zur Luftgeschwindigkeit. Zugluft ist dabei zu vermeiden, diese entsteht durch einen Luftstrahl, der nicht auf den ganzen Körper einwirkt (VAN CAENEGEM und WECHSLER 2000). Sie ist eine gerichtete Strömung, die kälter als die Umgebungstemperatur empfunden wird und nur partiell auf die Tiere einwirkt (VAN CAENEGEM und WECHSLER 2000). Zugluft kann in Vollspaltenbodenställen auch bei Temperaturen über  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  zu vermehrter Haufenlage führen (BEA 2004). Neben der Luftgeschwindigkeit spielt auch der Turbulenzgrad eine Rolle. Je größer die Luftturbulenz, desto größer das „Luftzugsempfinden“ (VAN CAENEGEM und WECHSLER 2000).

#### **2.5 Möglichkeiten zur Reduzierung von Hitzestress in Haltungssystemen von Schweinen**

Die Stallbelüftung in der Nutztierhaltung ist ein wichtiger Faktor für den Tierschutz und die Schadstoffkonzentration (HEMPEL et al. 2018). Der daraus resultierende Hitzestress bei Schweinen wird in Zukunft zunehmen. Selbst in gemäßigten Klimazonen wie in Mitteleuropa werden wirtschaftliche Verluste für die Landwirte erwartet (VITT et al. 2017). In den sogenannten „künstlichen Lebensräumen“ sind alle baulichen Einrichtungen sowie Gegenstände enthalten, mit denen die Tiere in Kontakt

kommen und die für ihr Wohlbefinden mit verantwortlich sind. Um den vielfältigen Anforderungen an die Haltung von Nutztieren gerecht zu werden, müssen Haltungssysteme nach RUDOVSKY (2004) gleichzeitig umwelt- und ressourcenschonend, tiergerecht, verbrauchergerecht, arbeitgerecht und wirtschaftlich sein. Nach SMIDT (1991) müssen zur Erreichung der Zielsetzung „tiergerecht“ vor allem die biologischen Bedürfnisse der Tiere erfüllt werden. Laut TROXLER (1981) ist unter einer tiergerechten Haltung eine Haltung zu verstehen, die dem Tier eine Umgebung bietet, in der es sich normal verhalten kann, keinen Schaden nimmt, die Körperfunktionen nicht gestört werden und die Anpassungsfähigkeit nicht überfordert wird. Auch die Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (TierSchNutzTV) schreibt vor: „[...] dass eine geeignete Vorrichtung vorhanden sein muss, die eine Verminderung der Wärmebelastung der Schweine bei hohen Stalllufttemperaturen ermöglicht [...]“ (TIERSCHNUTZTV § 22 ABSCHNITT 5). Die Möglichkeiten Schweineställe zu kühlen sind vielseitig. In der Abbildung 4 ist eine Übersicht zur Kühlung von Schweinen bzw. Schweineställen vereinfacht dargestellt.

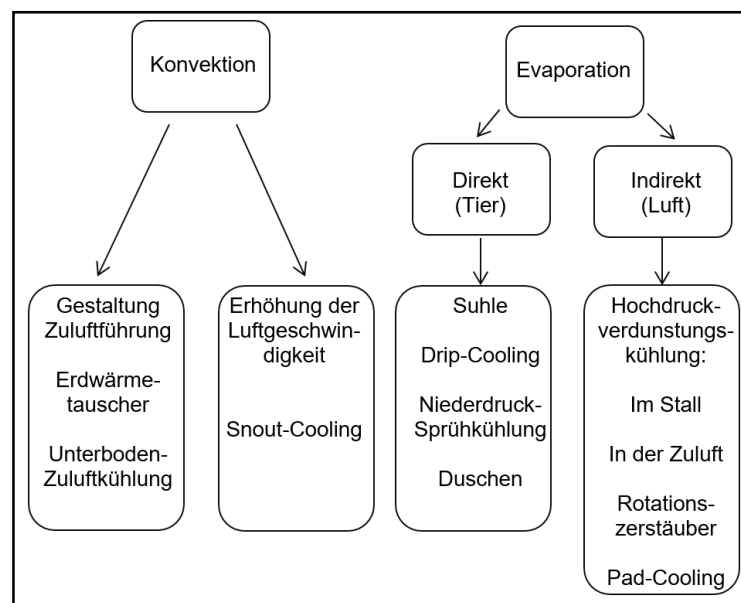


Abbildung 4: Übersicht von Kühlungsmöglichkeiten in zwangsgelüfteten Schweineställen. Eigene Darstellung in Anlehnung an RATSCHOW et al. (2008).

Die dargestellten Kühlsysteme funktionieren auf zwei Arten. Der eine Teil nutzt die Konvektion, den Pufferspeicher des Erdreichs. Der andere Teil, die Evaporation, nutzt Wasser zur adiabatischen Kühlung. Es können dabei drei Arten von Befeuchtungssysteme unterschieden werden: Hochdruckzerstäubung, Sprüh- und Verdunstungsbefeuchtung. Diese Systeme arbeiten entweder im Hoch-, Mittel- oder

Niederdruckverfahren und können je nach Stallsystem vor oder im Stallgebäude installiert werden. Es gibt viele Kombinationsmöglichkeiten von Befeuchtungsgeräten (WILSON et al. 1983). Im weiteren Kenntnisstand werden als Kühlvarianten aus dem Bereich Konvektion der Erdwärmetauscher sowie bei der Evaporation das Kühlpad (Pad-Cooling) vorgestellt.

### **2.5.1 Evaporation**

Bei der Wasserverdunstung wird Wärmeenergie benötigt, die aus der behandelten Luft absorbiert wird und somit die Temperatur der behandelten Luft absinkt (SAMER et al. 2015). Nach Definition von STEPHAN und MAYINGER (1992) wird die sensible Wärme der Luft in latente Wärme überführt und die Systemtemperatur nimmt ab. HOY et al. (2006) beschrieb diese Wärmeabgabe über Evaporation auch als Verdunstungswärme. WIERSMA and SHORT (1983) erwähnten diesen Effekt als adiabatisch (nicht hindurchgehend). Die Wärmemenge die der Luft entzogen wird, entspricht der vom Wasser absorbierten latenten Verdampfungswärme von  $2,4 \text{ kJ g}^{-1} [\text{H}_2\text{O}]$  bei  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  (RENAUDEAU et al. 2012). Theoretisch könnte die Luft auf die Kühlgrenztemperatur (minimal mögliche Temperatur) abgekühlt werden, sofern die Änderung unter idealen adiabatischen Bedingungen stattfände (ANONYM 2003). Das ist jedoch in der praktischen Lüftungstechnik nicht möglich.

### **2.5.2 Adiabatische Zuluftkonditionierung**

Für die Zuluftbefeuchtung in Tierställen wird zwischen Sprühbefeuchtung im Frischluftkanal und in den Stallabteilen selbst unterschieden. Bei dem Hochdruckverfahren wird mit einem Druck von etwa 70 bar Wassertropfen (ca. 10 Mikron) vernebelt. Diese werden sofort von der Luft aufgenommen und es kommt somit nicht zu einer Befeuchtung des Stallmaterials. Bei der Konzeption eines Mitteldruckverfahrens wird der Wasserdruck auf 20 bar reduziert. Die Wassertropfen sind etwa 30 Mikron groß (BÜSCHER et al. 2008). Eine weitere Minderung des Druckes auf 3-5 bar (50 Mikrometer) wird im Niederdruckverfahren verwendet. Diese Möglichkeit wird genutzt um die Tiere direkt mit Wasser abzukühlen (CZARICK and FAIRCHILD 2008). Nach ZENTNER (2006) wird ein Kühleffekt wie beim Suhlen erreicht. Eine weitere Möglichkeit der adiabatischen Zuluftkonditionierung ist der Einsatz eines Kühlpads. Die Zuluft wird dabei beim Einströmen in den Stall durch eine mit Wasser

benetzte Oberfläche (Pad) geführt und so die sensible Wärme der Luft in latente Wärme überführt (VITT et al. 2017). Es erfolgt die Verdampfung von Wassermolekülen aus der flüssigen Phase in die Dampfphase, bis ein dynamisches Gleichgewicht erreicht ist. Für diesen Prozess wird Energie adiabatisch umgewandelt (HAAS 2002). Dieses Prinzip hat aufgrund seiner Einfachheit bei Verwendung von natürlichen Ressourcen (Wasser) in der Klimatechnologie zugenommen (CHEN et al. 2011). Die Effektivität des Systems der adiabatischen Zuluftkonditionierung sinkt mit zunehmender relativer Luftfeuchtigkeit der Zuluft, aufgrund der begrenzten Wasseraufnahmefähigkeit der Luft (LUCAS et al. 2000; BUCKLIN et al. 2009). Es wurde nachgewiesen, dass die Umgebungstemperatur einen größeren Einfluss auf die physiologischen Messungen wie Tageszunahmen, Gewicht und Körpertemperatur der Tiere als die relative Luftfeuchtigkeit hat (HUYNH et al. 2005; HAEUSSERMANN et al. 2007a). Die Effektivität von Kühlpads ist insgesamt als höchste, innerhalb der Befeuchungskühlung anzusetzen, mit möglichen Temperatursenkungen von 8 K (GATES et al. 1991). TIMMONS und BAUGHMAN (1983) wiesen Unterschiede um bis zu 15 % in der Effektivität nach, wenn das Kühlpad direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist. Bei der Berieselung der Kühlpads mit Wasser ist auch die Wassertemperatur zu beachten. Bei warmem Wasser, steigt die zur Evaporation genutzte Wassermenge um bis zu 73 % und die Temperatur der konditionierten Luft steigt, statt zu fallen. Die Effektivität eines Kühlpads nimmt folglich mit ansteigender Wassertemperatur um bis zu ca. 1/6 ab (SIMMONS und LOTT 1996). Mit zunehmender relativer Luftfeuchte der Zuluft, sinkt die Effektivität, analog zu anderen Befeuchungskühlungen, aufgrund der begrenzten Wasseraufnahmefähigkeit der Luft (ABSHOFF 1974; LUCAS et al. 2000; VAN CAENEGEM und WECHSLER 2000; HÖRNER und REEKER 2011). Auch die Luftgeschwindigkeit (BOTTCHEr et al. 1991) sowie der Widerstand durch das Pad den die Luft zu überwinden hat, sollte bei der Effizienz solcher Anlagen berücksichtigt werden (ARBEL et al. 1999).

Die Kühleffizienz einer Verdunstungskühlung lässt sich nach ABDEL-GHANY und KOZAI (2006) danach abschätzen, in welchem Maße sich die gekühlte Luft der theoretischen, thermodynamischen Kühlgrenztemperatur der ungekühlten Luft annähert. Nach LILJEQUIST und CEHAK (1984), HAAS (2002) und HAEUSSERMANN et al. (2007a) ist die Wassermenge und die Zeitkonstante für die Verdampfung von Wasser hauptsächlich vom Sättigungsdefizit, dem Wasserdampfpartialdruck und der Wasseroberfläche in



Kontakt mit der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit abhängig. Nach DAĞTEKIN et al. (2011) haben auch die Strukturmerkmale von Kühlpads Auswirkungen auf das Kühlpotential. Um eine zu hohe Luftfeuchtigkeit zu vermeiden ist daher eine ausreichende Belüftung für dieses System essentiell (HAEUSSERMANN et al. 2007b). Mit Erhöhung der Luftgeschwindigkeit durch das Pad, verringert sich die Kühleffizienz. Als Ursache vermutet ALBRIGHT (1990) die kurze Austauschzeit der Luft mit der Wasser benetzten Oberfläche. Als Alternative könnte die relative Luftfeuchtigkeit mit Hilfe von Adsorptionsmitteln reduziert werden bevor diese durch das Kühlpad strömt (SAMER et al. 2015). Die so vorbehandelte Luft ist dann in der Lage, mehr Feuchtigkeit aus den Kühlkissen zu absorbieren. Aus Untersuchungen von BECK (1996) geht hervor, dass bei einer Verringerung der relativen Luftfeuchtigkeit um 10 % eine Abkühlung von 1,65 K möglich ist.

In der Praxis bereits bewährte Lösungen von Kühlpads basieren meistens auf Cellulose- bzw. Kunststoffpads (KOCA et al. 1991). Diese Materialien sind teuer in der Anschaffung und aufwendig herzustellen (LIAO und CHIU 2002). In einer Studie von CIELEJEWSKI (2010) wird auf das Kühlpotential von Ziegellochsteinen als Pad bei einer adiabatischen Zuluftkonditionierung hingewiesen. Die Untersuchungen zeigen im Durchschnitt eine Abkühlung der Außentemperatur von 4 K sowie eine gesamteinheitliche Reduzierung der Temperaturamplitude. Bei der Verwendung von Ziegellochsteinen ist zu beachten, dass diese regelmäßig gereinigt werden müssen, um eine Verschmutzung durch Algen und Keimbesatz zu vermindern. Da diese mit der Zuluft in den Stall getragen werden könnten und die Effektivität der Kühlung schmälern (ARBEL et al. 1999). Wissenschaftliche Untersuchungen zur Dimension für ein Modul zur Kühlung von Nutztierställen mit Ziegellochsteinen als Pad liegen derzeit nicht vor.

### **2.5.3 Erdwärmetauscher**

Der Erdwärmetauscher (EWT) basiert auf dem Temperaturunterschied zwischen Außenluft- und der Temperatur im Erdkanal. Diese wird maßgeblich durch den Bodentyp und Rohrdurchmesser sowie dessen Struktur beeinflusst. Die konditionierte Zuluft wird anschließend durch die Luftströmung mitgeführt (Konvektion) und gelangt in den Stall (DEGLIN et al. 1999). Die Nutzung von Erdwärme bringt einige Vorteile bei der Klimatisierung von Nutztierställen (MUN et al. 2020). Die geringe Temperaturschwankung von 8,2 bis 7,5 °C in 2 m Erdtiefe ist ein wesentlicher Effekt (PAAR et al. 1990). HESSEL und VAN DEN WEGHE (2011) stellten eine 70%ige Reduzierung von Lufttemperaturschwankungen im Vergleich zur Außenluft durch die Zuluftkonditionierung mittels Erdwärmetauscher fest. Im Sommer konnte die Zuluft nach Passieren des EWTs um bis zu 6 K gekühlt werden. Im Winter wurde eine Erwärmung der Zuluft um bis zu 14 K erzielt. Diese Lufttemperaturdifferenzen entsprechen dem von (HUIJBEN und HOOFS 1997) ermittelten Bereich. Auch in Langzeitstudien von KROMMWEH et al. (2014) sind die Vorteile eines EWT positiv zu bewerten. Festgestellt wurde, dass die Zuluft zu 93,7 % erwärmt und zu 6,3 % der Betriebsstunden gekühlt wurde. Weitere positive Effekte waren ein stabileres Stallklima durch ganzjährige Konditionierung durch Vorwärmen und Vorkühlen der Zuluft (Amplitudendämpfung). DEGLIN et al. (1999) merken an, dass die Luftgeschwindigkeit in den Tauscherrohren einen Einfluss auf die Temperaturdifferenz zwischen der Außenluft und der Zuluft nach Passieren des EWT hat. Geringere Luftgeschwindigkeiten führen zu höheren Lufttemperaturdifferenzen.

### 3 Material und Methode

#### 3.1 Technikversuch

Die notwendigen Experimente wurden unter einheitlichen Bedingungen in der Abteilung für Verfahrenstechnik in der Veredelungswirtschaft im Department für Nutztierwissenschaften der Universität Göttingen (Deutschland) durchgeführt. Das Technikmodul besteht neben den Zu- und Abluftkanälen (jeweils 100 cm \* 100 cm) aus einem Mittelstück (150 cm \* 100 cm) und setzt sich aus drei Segmenten zusammen (Abbildung 5).

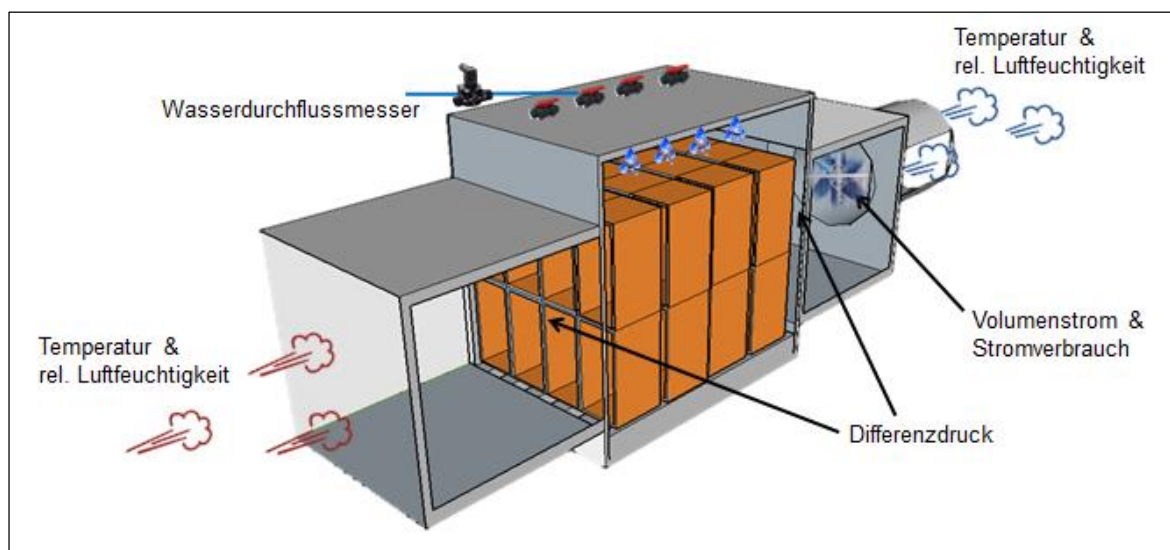


Abbildung 5: Innenansicht des Technikmoduls zur Zuluftkonditionierung mit geöffneten Seitenwänden. Variante mit 32 Ziegellochsteinen sowie horizontaler Befeuchtung für jede Reihe. Axialventilator mit max. 12.000 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> freiblasend, 890 U/min.

Für die Untersuchungen wurden zwei baugleiche Module konstruiert. Es wurde immer nur ein Parameter gegenüber dem Referenzmodul verändert, so dass eine direkte Vergleichbarkeit von Effekten gewährleistet war. Die Konstruktion der Module wurde mit Siebdruckplatten gewählt (Abbildung 6). Die Wärmeleitzahlen für finnisches Sperrholz (BS 2750) liegen bei 0,145 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>.

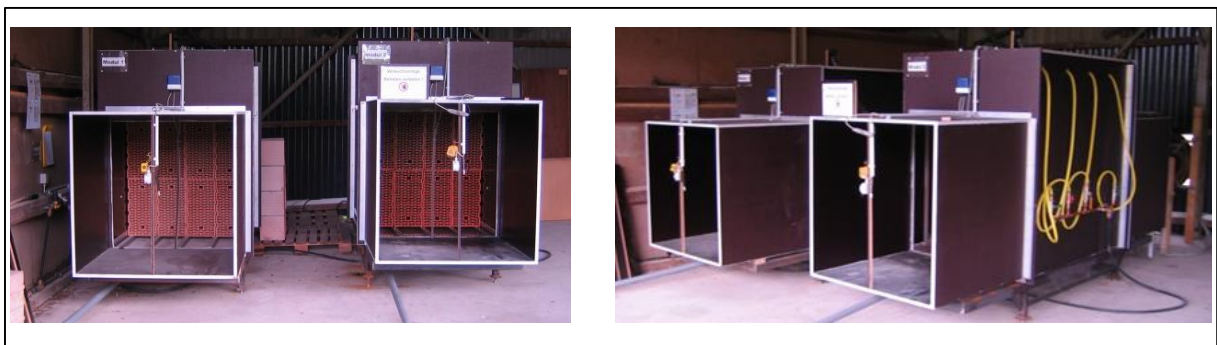







Abbildung 6: Außenansicht der Technikmodule zur Zuluftkonditionierung am Standort Göttingen.

## Material und Methode

Als Austauschoberfläche fungierten Ziegellochsteine, Cellulose- und Kunststoffpads. Die technischen Daten der Materialien sind aus Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Materialien, die als Austauschoberfläche im Technikumversuch fungieren.

Bild					
Name	Ziegellochstein	Ziegellochstein	Ziegellochstein	Kunststoff	Cellulose
Codierung	STD12	PVZ	WS07	KS	CE
Maße [mm/Einheit]	247*249*490	497*249*300	247*249*490	600*150*1000	600*150*1000
Gewicht [kg/Einheit]	19,6	29,9	19,6	5,9	2,2
Gesamtoberfläche [je Einheit, m <sup>2</sup> ]	4,31	1,15	2,71	6,75	12,9
Gesamtaustausch- Oberfläche im Modul [m <sup>2</sup> ]	34,48	9,20	21,68	9,45	18,06
Anschaffungspreis [€ / m <sup>2</sup> ]	20,00	20,00	20,00	66,00	60,00

Die Bewässerungsanlage im Mittelstück wurde über das Klimaprogramm Möller Office, mit Hilfe eines Magnetschaltventiles geregelt. Je Materialreihe waren zwei Air-Injektor Kompakt-Flachstrahldüsen (IDK 120-01) von der Firma Lechler verbaut. Der Abstand zu den Materialreihen betrug 50 cm. Der Wasserdruck war konstant bei 3 bar. Um eine maximal befeuchtete Oberfläche zu gewährleisten, wurde das Bewässerungsintervall auf 30 Sekunden sprühen – 30 Sekunden Pause fixiert. Der Wasserzufluss war  $9,6 \text{ l h}^{-1}$  je Materialreihe. Die Außenluft wurde mit Unterdruck durch die mit Wasser benetzte Oberfläche geführt. Im Abluftkanal des Moduls war ein Ventilator des Typs FF063-6E der Firma Ziehl-Abegg eingebaut. Die Steuerung erfolgte ebenfalls über das Mess- und Datenerfassungssystem Möller Office Software. Sowohl vor dem Lufteintritt in das Modul, als auch unmittelbar nach Luftaustritt aus dem Modul wurden kontinuierlich alle 3 Minuten die folgenden Parameter online erfasst. Zur Messung der Temperatur wurden Sensoren des Typs KTY81-2 Series der Firma Phillips mit einem Messbereich von -55 bis +150 °C verwendet. Zur Ermittlung der relativen Luftfeuchte handelte es sich um EE060 Feuchtefühler des Typs HCT01-00D der Firma E+E Elektronik GmbH mit einem Arbeitsbereich von 0 bis 100 % relative Luftfeuchte. Die

Differenzdrucksensoren waren von der Firma Ziehl-Abegg. Hierbei handelte es sich um spezielle UNIcon CPG-.AV Sensoren mit Keramik-Biegebalkentechnologie in einem Messbereich von 0 bis 200 Pa. Die Anordnung der Sensoren ist der Abbildung 5 zu entnehmen. Zusätzlich wurden die eingesetzte Wassermenge, der Luftvolumenstrom sowie der Stromverbrauch gemessen.

### 3.1.1 Methode

Der Untersuchungszeitraum war von Juli bis September 2016 sowie von Juni bis September 2017. Hierbei wurden bei jeder Variante kontinuierlich Daten über Messperioden von mindestens 24 Stunden erhoben. Somit wurde gewährleistet, dass Tageseffekte des Außenklimas berücksichtigt wurden. Zuerst wurde der grundsätzliche Effekt einer adiabatischen Zuluftkonditionierung auf Ziegellochsteine verglichen. Anschließend wurde der Einfluss des Luftvolumenstromes sowie der Anzahl an Steinreihen (Oberflächenvergrößerung) untersucht. Im weiteren Abschnitt wurde der Einfluss verschiedener Materialien auf die adiabatische Zustandsänderung analysiert (Tabelle 2).

Tabelle 2: Variantenplan für den Untersuchungszeitraum Juli bis September 2016 und Juni bis September 2017 am Versuchsstandort Göttingen. Messintervall = 3 Minuten. STD 12, PVZ, WS 07 = Ziegellochsteine; KS = Kunststoff; CE = Cellulose.

<b>Versuchsdesign</b>	<b>Reihen</b>	<b>Luftvolumenstrom [m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>]</b>	<b>Material Codierung</b>
1 Effekt der Austauschoberfläche von Ziegellochsteinen	1	5000	STD 12, PVZ, WS07
2 Effekte von Luftvolumenstrom und Steinreihen	1,2,3,4	5.000, 7.000, 10.000	STD 12
3 Effekte von Ziegellochstein, Kunststoff- und Cellulosepad	1	5.000, 7.000, 10.000	STD 12, KS, CE

### 3.1.2 Datenanalyse (Technik- und Praxisversuch)

Für die Berechnung der Zielparameter Befeuchtungsgrad, Kühlleistung und Massenstrom Wasser können Zustandsgrößen über die erhobenen Daten am Ein- und Ausgang des Kühlaggregats berechnet werden. Die Temperatur  $T$  [°C] vor dem Modul ( $t_{in}$ ) und nach dem Modul ( $t_{out}$ ) sowie relativer Luftfeuchtigkeit  $\varphi$  [%] vor dem Modul ( $\varphi_{in}$ ) sowie nach dem Modul ( $\varphi_{out}$ ) und dem Luftvolumenstrom  $\dot{V}$  [m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>] am Ausgang können somit berücksichtigt werden. Die nachführenden Rechnungen basieren aus VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2013) sowie (FEUERRIEGEL 2016). Der Luftvolumenstrom am Eingang der Kühlung berechnet sich durch die folgende Gleichung 1:

$$\dot{V}_l = \frac{\dot{M}}{M_D} * 3600 \quad (1)$$

hierbei gilt für den Massenstrom  $\dot{M}$  [kg s<sup>-1</sup>]

$$\dot{M} = \frac{\dot{V}}{3600} * \rho \quad (2)$$

und für den Massenstrom des Wasserdampfs  $\dot{M}_D$  [kg s<sup>-1</sup>]

$$\dot{M}_D = x * M_L \quad (3)$$

sowie für den Massenstrom der Luft  $\dot{M}_L$  [kg s<sup>-1</sup>] die Gleichung 4:

$$\dot{M}_L = \frac{\dot{V}}{3600} * \frac{\rho}{(1+x)} \quad (4)$$

Für die Bestimmung der Dichte  $\rho$  [kg m<sup>-3</sup>] wurde die Gleichung 5 angewendet.

$$\rho = \frac{p}{R_L * (273,15 + T)} * \frac{(1+x)}{\left(1 + \frac{R_D}{R_L} x\right)} \quad (5)$$

wobei  $p$  als Luftdruck [Pa] mit 9500 am Eingang sowie 8500 am Ausgang des Kühlaggregats zu verstehen ist.

Der Wassergehalt  $x$  [g kg<sup>-1</sup>] der Luft errechnet sich aus Gleichung 6

$$x = \left(\frac{R_L * \varphi}{100} * pDS\right) / R_D * \left(\frac{p - \varphi}{100} * pDS\right) \quad (6)$$

wobei,

$R_L = 287,058$  J kg K die Gaskonstante der trockenen Luft und

$R_D = 461,523$  J kg K die Gaskonstante von Wasserdampf ist.

Der Sättigungsdampfdruck  $p_{DS}$  [Pa] kann einer Wasserdampf tabel entnommen werden. Eine ausreichend genaue Näherungsgleichung für den Temperaturbereich  $0 \leq \vartheta \leq 60^\circ\text{C}$  ist in Gleichung 7 angegeben. Nach WAGNER und PRUSS (1993) wurde ein „Visual Basic for Applications“ (VBA) Skript in Microsoft Office Excel erstellt:

$$\ln\left(\frac{p}{p_c}\right) = \frac{T_c}{T} [a_{1\tau} + a_{2\tau^{1.5}} + a_{3\tau^3} + a_{5\tau^{3.5}} + a_{5\tau^4} + a_{6\tau^{7.5}}] * (T + 273,15) * 10^5 \quad (7)$$

Dabei gelten für die Formelzeichen folgende Kennwerte:

$$\begin{array}{lll} T_c = 647,096 \text{ K} & \tau = 1 - \theta & p_c = 22,064 \text{ MPa} \\ a_1 = -7,85951783 & a_2 = 1,84408259 & a_3 = -11,866497 \\ a_4 = 22,6807411 & a_5 = -15,9618719 & a_6 = 1,80122502 \end{array}$$

Die Berechnung des Dampfdruckes  $p_D$  [Pa] wurde bestimmt durch die Gleichung 8:

$$p_D = \frac{p_{DS} * \varphi}{100} \quad (8)$$

In der Gleichung 9 wurde anschließend der Massenstrom des Wassers  $\dot{m}_W$  [g s<sup>-1</sup>] errechnet

$$\dot{m}_W = (\dot{M}_{out} - \dot{M}_{in}) * 1000 \quad (9)$$

Für die Berechnung der Enthalpie  $h$  [kJ kg<sup>-1</sup>] wurde folgende Gleichung 10 angenommen

$$h = (c_{pl} + T + x * (\Delta h_{VO} + c_{pD} * T)) / 1000 \quad (10)$$

Wobei die Spezifische Wärmekapazität der Luft  $c_{pL}$  mit 1000 J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, die Verdampfungswärme des Wassers  $\Delta h_{VO}$  mit 2500000 J kg<sup>-1</sup> sowie die spezifische Wärmekapazität des Wasserdampfes  $c_{pD}$  mit 1860 J kg K<sup>-1</sup> angenommen werden. Im Anschluss daran wurde die Kühlleistung  $\dot{Q}$  [kW] in Gleichung 11 berechnet

$$\dot{Q} = \dot{M}_{in} * h_{in} - \dot{M}_{out} * h_{out} \quad (11)$$

Maximal erreicht werden kann die Sättigungsfeuchtebeladung bei der zum Luft Eintrittszustand gehörenden Kühlgrenztemperatur  $\vartheta_K$ . Dazu wurde ein weiteres VBA-Skript (Gleichung 12) in Excel erstellt nach (FEUERRIEGEL 2016):

$$\vartheta_K = \left(\frac{M_W}{M_L}\right) * \frac{p_{DS}}{p - p_{DS}} * (T + 273,15 + p * 10^{-5} + x) - 273,15 \quad (12)$$

Danach kann der Befeuchtungswirkungsgrad  $\eta$  [%] (Gleichung 13) errechnet werden. Definiert wird das Ergebnis als Verhältnis zwischen erzielter Absoluter-Differenz (Zustand vor und nach dem Befeuchter) zu der maximalen möglichen Absoluten-Differenz (Zustand vor dem Befeuchter und theoretisch maximal erreichbarer Zustand an der Kühlgrenze, entsprechend Sättigungspunkt) (EICHMANN 1997).

$$\eta = \frac{(T_{out}-T_{in})}{(\vartheta_K-T_{in})} * 100 \quad (13)$$

### 3.1.3 Statistische Auswertung

Die Auswertung der Ergebnisse wurde mit SAS (Inst. Inc., Cary, NC) Version 9.4 mit einem gemischten Modell durchgeführt. Die Schätzmethode basiert auf REML-Spezifikation. Diese Technik wurde verwendet, um die Effekte auf Temperatur- und Druckdifferenz, Kühlleistung sowie Befeuchtungsgrad zu testen. Als feste Effekte wurden gewählt:

- „Volumenstrom“ 5.000, 7.000 und 10.000 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>
- „Steinreihe“ 1,2,3 und 4
- „Modul“ 1 und 2

sowie die Interaktion zwischen diesen Faktoren. Unabhängige Variablen waren die „relative Luftfeuchtigkeit (%)“ und die „Außentemperatur (°C)“. Um die Signifikanzen zu testen, wurde ein Konfidenzintervall für Parameterschätzer von 95 % gewählt. Als Testmethode wurde der Tukey-Test verwendet. Somit wurden insgesamt 8 statistische Modell gerechnet. Die Ergebnisse aus der Abbildung 11, Abbildung 12, Abbildung 17 und Abbildung 22 sind der deskriptiven Statistik entnommen worden. Aus diesen Datensätzen wurden für die Abbildung 11, Abbildung 17 und Abbildung 22 entsprechenden Merkmale auf der y- Achse, Gruppen mit dazugehörigen Mittelwerten abgebildet. Die Zusammenhänge zwischen zeitgleichen Messwerten zweier verschiedener Merkmale wurde mit dem Korrelationskoeffizienten (Pearson-Korrelation) ermittelt. Dabei wurde die Angabe einer Fischer-Korrelation berücksichtigt. Das Konfidenzintervall war 95 %.



### 3.2 Praxisversuch

Die Untersuchungen wurden auf einem landwirtschaftlichen Betrieb mit Sauenhaltung im Landkreis Vechta (Norddeutschland) vom 22.05.2017 bis 12.07.2018 durchgeführt. Die Sauenlinie aus dänischer Herkunft ist eine Kreuzung von Dänischer Landrasse (LL) und Dänisch Yorkshire (YY). Die Fütterung der Sau erfolgt durch Trockenfütterung und Volumendosierer in jeder einzelnen Bucht. Wasser steht der Sau ad libitum zur Verfügung.

#### 3.2.1 Betriebsbeschreibung

Für das Vorhaben stand ein Versuchs- sowie Referenzabteil mit 26 Abferkelbuchten zur Verfügung. Die baugleichen Abteile waren 6,0 m breit und 21,8 m lang, sowie Buchtenmaße von 2,6 m \* 1,6 m (Abbildung 7). Das konventionelle Haltungssystem mit Ferkelschutzkorb, Geradaufstellung quer zum Mittelgang sowie Spaltenboden und Ferkelnest ist 2003 erbaut worden. In den ersten drei Lebenstagen der neugeborenen Ferkel wird eine Wärmelampe in jeder Bucht zugeschaltet. Das Ferkelnest wurde zusätzlich mit Fußbodenheizung erwärmt. Im Jahr 2017 wurde im drei- im Jahr 2018 im ein-Wochen-Rhythmus mit vierwöchiger Säugezeit gewirtschaftet. Nach dem Absetzen der Ferkel wird das Abteil gewaschen und desinfiziert. In jedem Abteil ist mittig ein Abluftschacht. Der Ventilator mit 68 cm Durchmesser erzeugt einen Unterdruck, wodurch Luft aus dem Dachraum durch die Rieseldecke gezogen wird. Der Klimacomputer regelt den Luftvolumenstrom für eine Solltemperatur im Abteil von 21 °C.

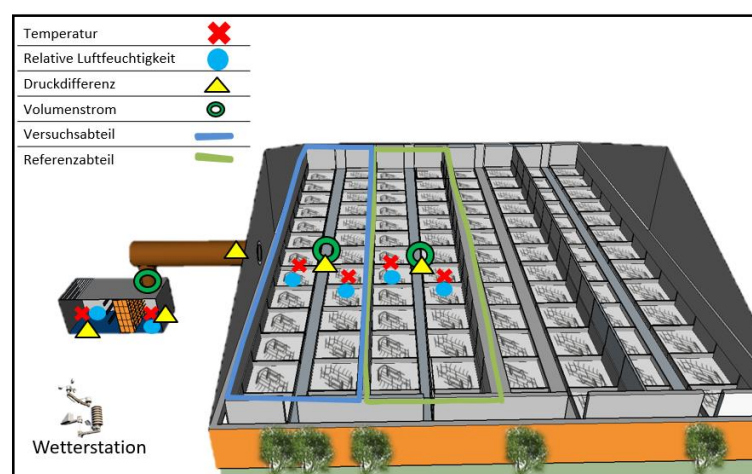


Abbildung 7: Übersicht der Messpunkte im Versuchs- und Referenzabteil sowie im Modul am Standort in Vechta.

### 3.2.2 Aufbau des Moduls

Ein Überseecontainer mit den Außenmaßen 6,0 m \* 2,4 m \* 2,5 m (Länge x Breite x Höhe) dient als Grundgerüst und wurde an der Westseite des Stalles in die Erde eingelassen (Abbildung 8).



Abbildung 8: Außenansicht des Moduls nach dem Einbau im Erdreich am Standort Vechta.

Anschließend wurden drei Wände aus insgesamt 123 quer aufgestellten Ziegellochsteinen in der Mitte des Containers errichtet. Bei den eingesetzten Ziegellochsteinen handelt es sich um UNIPOR-W12 Planziegel. Ein Stein des Formats 16 DF besitzt die Maße 24,7 cm x 49,0 cm x 24,9 cm (Länge x Breite x Höhe) und hat eine Gesamtoberfläche von 4,31 m<sup>2</sup> (Tabelle 1). Die Ziegellochsteine dienen als Austauschoberfläche für ein adiabatisches Kühlsystem. Dafür wurden 50 cm vor den Steinreihen, drei Balken mit insgesamt 15 Air-Injektor Kompakt-Flachstrahldüsen (IDK 120-01) von der Firma Lechler verbaut. Abbildung 9 zeigt das Modul mit der eingebauten Messtechnik.

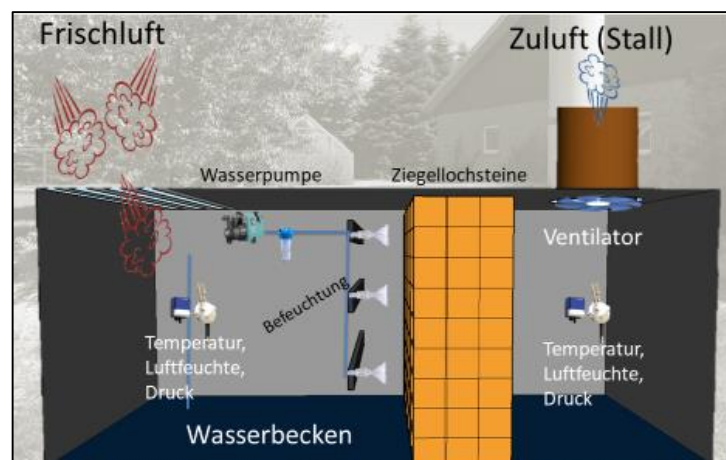


Abbildung 9: Querschnitt des Moduls zur Zuluftkonditionierung mit eingebauter Messtechnik.

Ein Schwimmventil 30 cm über den Containerboden sorgte für einen kontinuierlichen Wasserstand im Modul. Dieses Wasser wurde mit Hilfe einer Wasserpumpe zu den Düsen gefördert. Der Wasserdruck war konstant bei 3 bar. Überschüssiges Wasser gelangte in das Wasserbecken zurück. Die Befeuchtung wurde in Abhängigkeit von der Außentemperatur automatisch eingeschaltet. Im Jahr 2017 ab 21 °C und im Jahr 2018 ab 20 °C Außentemperatur. Eine zwei Quadratmeter große Öffnung oberhalb der Steinreihen diente für die Zuluft. Im Abluftkanal des Moduls war ein Ventilator des Typs FF063-6E der Firma Ziehl-Abegg eingebaut. Die Außenluft wurde mit Unterdruck durch die mit Wasser benetzte Oberfläche der Ziegellochsteine geführt und gelangte anschließend ins Abteil. Dabei arbeitet der Ventilator im Stall synchron mit dem Ventilator im Modul. Der zusätzliche Ventilator war nötig, da der Strömungswiderstand in dem Modul zu groß, und der im Abteil eingebaute Ventilator für solche Leistungen nicht vorgesehen war. Zudem handelt es sich bei diesem Verfahren um eine nachträgliche Möglichkeit die Zuluft in dem Abteil zu konditionieren und wurde daher unabhängig von der im Stall eingebauten Technik installiert. Um sicherzustellen, dass die durch das Modul angesaugte Zuluft nur in das zu untersuchende Abteil einströmt, wurde über diesem eine zweite Decke in den Dachraum eingebaut. Somit war die Luftzufuhr des Versuchsabteils vom anderen Abteil getrennt. Im Abferkelabteil sinkt die konditionierte Zuluft schließlich durch eine Rieseldecke in den Tierbereich, erwärmt sich dort durch die Wärmeabgabe der Tiere und wird anschließend durch den Ventilator im Abteil abgesaugt und in den zentralen Abluftkanal geführt. Die Zuluftführung für das Versuchsabteil führte ganzjährig durch das Modul.

### **3.2.3 Messtechnik**

Für die Untersuchungen wurden sowohl vor dem Lufteintritt in das Modul, als auch unmittelbar nach Luftaustritt aus dem Modul die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchte sowie die Luftdruckdifferenz und der Luftvolumenstrom online alle 5 Minuten erfasst. In den Abteilen wurden die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit an zwei Messpunkten 150 cm über dem Stallboden erhoben. Die gesamte Datenerfassung wurde kontinuierlich alle 6 Minuten online gespeichert. Zur Messung der Temperatur wurden hierbei Sensoren des Typs KTY81-2 Series der Firma Phillips mit einem Messbereich von -55 bis +150 °C verwendet. Zur Ermittlung der relativen Luftfeuchte handelte es sich um EE060 Feuchtefühler des Typs HCT01-00D der Firma E+E

Elektronik GmbH mit einem Arbeitsbereich von 0 bis 100 % relative Luftfeuchte. Für die Druckdifferenzen wurden spezielle UNIcon CPG-.AV Differenzdrucksensoren der Firma Ziehl-Abegg mit Keramik- Biegebalkentechnologie mit einem Messbereich von 0 bis 200 Pa verwendet. Neben diesen Parametern wurde der Luftvolumenstrom durch den sich im Abluftschacht befindenden Ventilator des Typs FF063-6E der Firma Ziehl-Abegg aufgezeichnet. Das Lüftungsprogramm von Möller Office, diente als Systemeinstellungs- und Datenaufzeichnungssoftware. Die Außenklimabedingungen wurden mit einer eigenen Wetterstation 20 Meter neben dem Versuchsstandort ermittelt.

### 3.2.4 Statistische Auswertung

Die Ergebnisse wurden in drei Versuchszeiträume unterteilt (Tabelle 3). Im ersten Versuchszeitraum wurde ab einer Außentemperatur ( $T_{out}$ ) > 21°C und im dritten  $T_{out}$  > 20°C adiabatisch befeuchtet. In den Wintermonaten wurde die adiabatische Befeuchtungsanlage deaktiviert (Versuchszeitraum 2). Die Datenanalyse berücksichtigt die Versuchszeiträume 1 und 3.

Tabelle 3: Übersicht der Versuchszeiträume im Praxisversuch ( $T_{out}$  = Außentemperatur)

Versuchsnummer	Zeitabschnitt	Befeuchtung	N (Messwerte)
1	22.05.17 - 28.09.2017	Ja, $T_{out}$ > 21°C	27158
2	29.09.17 - 25.04.2018	nein	49292
3	26.04.18 - 12.07.2018	Ja, $T_{out}$ > 20°C	25665

Insgesamt fehlt eine Datenaufzeichnung von 59 Tagen. Während des Versuches kam es zu Stromausfällen, Störungen im Betriebsablauf, Wartungen und Messfehlern. Die Auswertung der Ergebnisse wurde mit SAS (Inst. Inc., Cary, NC) Version 9.4 mit einem linearen Modell durchgeführt. Bei der Beurteilung des Moduls wurde als erste Zielgröße die Temperaturdifferenz (K) und in einem weiteren Modell die relative Luftfeuchtheitsdifferenz (%) ausgewertet. Feste Effekte waren die „Befeuchtung (ja/nein)“, „Tageszeit (6 Gruppen je 4 h, Start bei 00 Uhr)“ und „Volumenstrom (120 Klassen von 100-12000 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>)“. Die zufälligen Effekte waren die „relative Luftfeuchtigkeit (%)“ sowie die „Außentemperatur (°C)“. Als Interaktion sind in das Modell die „Außentemperatur“ \* „Befeuchtung“ und die „Tageszeit“ \* „Befeuchtung“ aufgenommen worden. Für die Beurteilung der Ergebnisse in der Abbildung 25 des

Befeuchtungsgrades wurde der Datensatz nach relativer Luftfeuchtigkeit in Gruppen sortiert (< 50, 50-70 und > 70 %). Die Werte entsprechen dem arithmetischen Mittelwert zur Temperaturdifferenz. Beim Stallklima wurde als erste Zielgröße die „Stallinnentemperatur (°C)“ und in einem weiteren Modell die „relative Luftfeuchtigkeit (%)“ definiert. Feste Effekte waren die „Befeuchtung (ja/nein)“ und „Tageszeit (6 Gruppen je 4 h, Start bei 00 Uhr)“ sowie das „Abteil (Versuchs- und Referenzabteil)“. Die zufälligen Effekte waren die „relative Luftfeuchtigkeit“ sowie die „Außentemperatur“. Als Interaktion sind in das Modell die „Außentemperatur“ \* „Befeuchtung“, die „Tageszeit“ \* „Befeuchtung“ und das „Abteil“ \* „Befeuchtung“ gewählt worden. Als Ergebnis wurden Lsmeans ausgegeben. Ein Konfidenzintervall für Parameterschätzer wurde mit 95 % gewählt. Der multiple Mittelwertsvergleich wurde mit dem Tukey-Test angewendet. Die Zusammenhänge zwischen zeitgleichen Messwerten zweier verschiedener Merkmale wurde mit dem Korrelationskoeffizienten (Pearson-Korrelation) getestet. Dabei wurde die Angabe einer Fishers Z-Transformation berücksichtigt. Das Konfidenzintervall war 95 %. Zur übersichtlicheren Darstellung wurden die Werte der Enthalpie (Abbildung 26) der Außenluft bei < ...,5 wurde ab- und >...,5 aufgerundet. Somit ergab sich jeweils ein Mittelwert aus der deskriptiven Statistik für Temperaturdifferenz, Luftgeschwindigkeit und Massenstrom Wasser. Die gleiche Prozedur wurde für die Abbildung 27 gewählt. Bei der Luftgeschwindigkeit wurde bei <...,5 ab- und > ...,5 aufgerundet. Die jeweiligen Mittelwerte für Temperaturdifferenz und Kühlleistung sind der deskriptiven Statistik entnommen.

### 3.2.5 Tierbeurteilung

Für die Tierbeurteilung wurden vom 13.02.2018 bis 03.09.2018 die Daten von 6 Durchgängen aufgenommen (Tabelle 4).

Tabelle 4: Übersicht der Abferkeldurchgänge mit Zeitverlauf vom Abferkeln zum Absetzen der Ferkel sowie Anzahl an Sauen im Abteil.

Durchgang	Zeit vom Abferkeln bis zum Absetzen		Sauen	
	Referenzabteil	Versuchsabteil	Referenzabteil	Versuchsabteil
1	13.02 – 12.03	06.02 - 05.03	20	22
2	19.03 – 16.04	12.03 – 09.04	18	24
3	23.04 – 21.05	16.04 – 14.05	26	20
4	28.05 – 25.06	21.05 – 18.06	23	22
5	02.07 – 30.07	25.06 – 23.07	19	21
6	06.08 – 03.09	30.07 – 27.08	20	20

Aus den Bestandserfassungsprogrammen (db-planer von BHZP, Ellringen, Deutschland) des Betriebes wurden für jedes Abteil und Durchgang die Paritätszahl der Sau, Abferkel- und Absetzdatum, Anzahl der lebend und tot geborenen Ferkel, Mumien, versetzte Ferkel, Verluste (getötet, erdrückt, Kümmerer, keine Angabe) sowie die abgesetzten Ferkel aufgenommen. Bis zum dritten Lebenstag der Ferkel hat der Landwirt Wurfausgleich innerhalb des Abteiles durchgeführt. Aus betrieblichen Gründen konnten die Absetzgewichte sowie tierspezifische Gewichte nicht erhoben werden. Innerhalb jedes Durchgangs und Abteils wurden zufällig 10 Sauen ausgewählt, wo am dritten Tag nach dem Abferkeln die Geburts- und am 20. Zyklustag die Ferkelgewichte von derselben Sau aufgenommen wurden. Diese Methode basiert in Anlehnung an (FANGMAN et al. 1996).

In die Auswertung zur Leistungsanalyse sind Datensätze von 255 Sauen mit 4508 lebendgeborenen und 3475 abgesetzten Ferkel eingegangen. Für die Bewertung der Ferkelgewichte wurden 120 Sauen mit 1795 Ferkeln berücksichtigt. Die Sauen wurden nach SURIYASOMBOON et al. (2006) in Gruppen eingeteilt:

- 1 = Jungsauen und zweiter Wurf,
- 2 = Sauen mit drei und vier Würfen sowie
- 3 = Sauen mit fünf und sechs Würfen.

Nicht berücksichtigt bei der Datenauswertung wurden die Tage, an denen umgestallt, gewaschen und desinfiziert wurde. Um den Effekt der Temperatur und Luftfeuchte zusammen zu betrachten, wurde der Temperatur-Luftfeuchtigkeits-Index (THI, temperature humidity index) nach THOM (1959) in Gleichung 14 berechnet,

wobei T die Außentemperatur (°C) und RF die relative Luftfeuchtigkeit (%) ist.

$$THI = (1,8 * T + 32) - \left[0,55 * \frac{RF}{100}\right] * [(1,8 * T + 32) - 58] \quad (14)$$

Die Konstanten wurden anhand von physiologischen Daten, wie dem Anstieg der Rektaltemperatur und der Atemfrequenz berechnet (GOLDMAN 1969; GATES et al. 1991; HAHN et al. 2003).

Der THI ist dimensionslos und wird wie in Tabelle 5 abgetragen mit normal, alarmierend, gefährlich und katastrophal bewertet (HUHNKE et al. 2001; EIGENBERG et al. 2005; NWSCR 2014).

Tabelle 5: Beurteilung des Temperature-Humidity-Index (THI) zur Einschätzung der stressenden Wirkung einer Wetterlage auf ein Tier.

THI-Bereich	Bewertung der Wetterlage
<74	normal
>74 - <79	alarmierend
>79 - 84	gefährlich
>84	katastrophal

### 3.2.6 Vorversuche zur Bestimmung der Ammoniak- und Feinstaubkonzentration

Die Ammoniakmessung erfolgte durch einen Polytron® C300 (Dräger, Lübeck - Deutschland). Die Sensoren sind zur kontinuierlichen Messung der NH<sub>3</sub>-Konzentration in der Stallluft geeignet. Die Genauigkeit liegt laut dem Hersteller bei 1,5 ppm bzw. ± 10 % vom Messwert. Die Positionierung der NH<sub>3</sub> Sensoren wurden mittig in 1,80 m Höhe in dem Versuchs- sowie im Referenzabteil positioniert. Eine detaillierte Beschreibung zu den Sensoren findet sich bei JASMUND et al. (2022). In Zusammenarbeit mit der Tierärztlichen Hochschule Hannover wurde an sechs Terminen (Tabelle 4) Luftkeim- und Modulwasseruntersuchungen durchgeführt. In Anlehnung von JARNYCH et al. (1976) und VDI 4251 BLATT 1 (2019) umfasst die Untersuchung eines Bioaerosols die Abscheidung von luftgetragenen Partikeln aus der Luft. Für die Bestimmung der „Pilze 25 °C und 36 °C m<sup>2</sup>“ in Tabelle 8 wurde das Spalteverfahren und für die Bestimmung der „Coliforme Bakterien m<sup>2</sup>“ in Tabelle 9 die Filtrationsmethode angewandt. Eine ausführliche Beschreibung zur angewendeten Methodik findet sich bei (KEMPF 2018). Die Messstellen zu Luftkeimuntersuchungen sind der Abbildung 10 zu entnehmen.

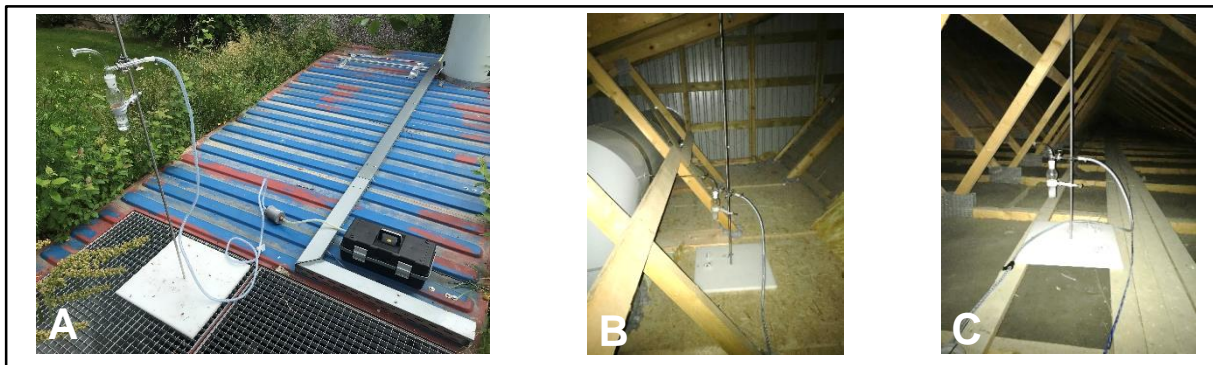


Abbildung 10: Messstellen zur Luftkeimuntersuchung am Versuchsstandort Vechta. A: vor dem Modul, B: Im Zuluftkanal des Versuchsabteils, C: oberhalb vom Rieselkanal des Referenzabteils.



### 3.2.7 Statistische Auswertung

Die Auswertung der Ergebnisse für den Praxisversuch erfolgte mit der Prozedur MIXED des Statistikprogramm SAS (Inst. Inc., Cary, NC) Version 9.4 mit einem gemischten Modell. Die Schätzmethode basiert auf REML-Spezifikation. In der Abbildung 33 wurden die Effekte auf: „Durchgang (1-6)“, „Abteil (Versuchs- und Referenzabteil)“, „Wurfgruppe (1 = Jungsauen und zweiter Wurf, 2 = Sauen mit drei und vier Würfen sowie 3 = Sauen mit fünf und sechs Würfen.)“ und „Geschlecht (m, w)“ getestet. Als feste Effekte wurden gewählt: „Anzahl abgesetzte Ferkel je Durchgang (1-6)“, „Abteil“, „Wurfgruppe“, „Geschlecht“ sowie die Interaktion zwischen „Durchgang\*Abteil“. In der Tabelle 7 waren die Effekte auf: „Durchgang“, „Abteil“ und „Wurfgruppe“ gewählt worden. Als feste Effekte: „Durchgang“, „Abteil“, „Wurfgruppe“ und die Interaktion aus „Durchgang“ und „Abteil“. In beiden Auswertungen war der zufällige Effekt die „Sauenummer (Ohrmarkennummer der Sau)“. Für den Luftvolumenstrom im Abteil in Abbildung 34 wurden die Effekte auf: „Abteil“, „Durchgang“ und „Befeuchtung (ja/nein)“ getestet. Als feste Effekte wurden gewählt: „Außenlufttemperatur (Stundenmittelwert 0-23)“, „Durchgang (1-6)“, „Stallinnentemperatur (Stundenmittelwert 0-23)“, „Stunde (0-23)“, „Abteil“, sowie die Interaktion aus „Abteil\*Durchgang“ und „Abteil\*Volumenstrom“. Das Signifikanzniveau wurde auf 5 % festgelegt. Als Testmethode wurde der Tukey-Test verwendet. Die Ergebnisse aus den Abbildung 31 und Abbildung 32 sind der deskriptiven Statistik entnommen worden und mit dazugehörigen Stundenmittelwerten nach Gleichung 14 abgebildet. Die Einstufung der Farbskala erfolgte anschließend mit Microsoft Excel für den entsprechenden THI-Bereich aus Tabelle 5. In der Zeit vom 13.02 bis zum 09.04 (1. und 2. Durchgang) war der THI in beiden Abteilen unter 74 und wurde grafisch nicht dargestellt.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Technikumsversuch

#### 4.1.1 Klima

Die Außentemperatur ( $T_{out}$ ) und die relative Luftfeuchtigkeit ( $rH_{out}$ ) korrelieren mit 0,7462 während des Untersuchungszeitraumes. Die Spannweite der Außentemperatur liegt dabei zwischen 5,0 und 35,6°C. Bei der relativen Luftfeuchtigkeit liegen die Werte zwischen 25,0 und 99,2 %. Aus Abbildung 11 wird erkennbar, dass die relative Luftfeuchtigkeit ab 6 Uhr kontinuierlich bis 18 Uhr im Mittelwert um 32,2 % abnimmt. Die Außentemperatur steigt zwischen 6 und 18 Uhr im Durchschnitt um 6,8°C an. Die Standardfehler nehmen bei beiden Einflussgrößen während des Tagesverlaufes ebenfalls zu. Im Untersuchungszeitraum wurde im Mittelwert eine relative Luftfeuchtigkeit von  $71,69 \pm 0,0765$  % ( $\pm$  Standardfehler des Mittelwerts) gemessen. Werden nur Werte zwischen 10 und 18 Uhr betrachtet, ergibt sich ein Mittelwert der relativen Luftfeuchtigkeit von  $58,84 \pm 0,1211$  %. Bei der Außentemperatur wurde ein Mittelwert von  $18,63 \pm 0,0208$  °C und während der oben definierten Tageszeit von  $22,10 \pm 0,0319$  °C ermittelt. Diese Erkenntnisse sollen als Grundlage für die Diskussion berücksichtigt werden.

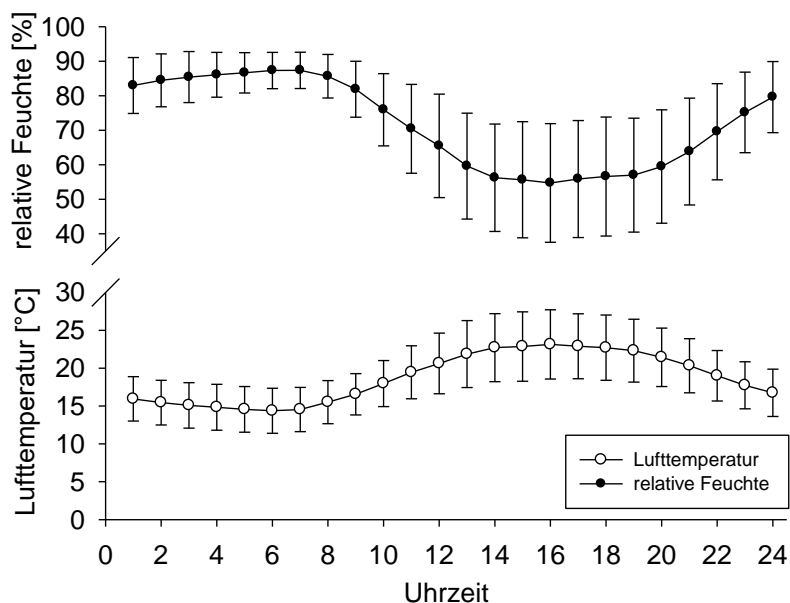


Abbildung 11: Durchschnittlicher Tagesverlauf der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit während des Untersuchungszeitraum Juli bis September 2016 sowie von Juni bis September 2017 in Abhängigkeit der Tageszeit.  $\pm$  Standardfehler. Stundenmittelwerte aus N 52.899.

Die Autoren sind sich einig, dass ein adiabatisches System sowohl von der Temperatur, als auch noch stärker, von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängt (BUCKLIN et al. 2009; DAĞTEKIN et al. 2009b). Die klimatischen Außenbedingungen variieren während des Tagesverlaufs. Verdunstungskühlsysteme sind am effektivsten bei hohen Temperaturen und niedrigen relativen Luftfeuchtigkeiten. Dies wäre zu den Mittagsstunden der Fall (AL-SULAIMAN 2002; FRANCO-SALAS et al. 2010). Hier kommt das System an seine physikalischen Grenzen (Kühlgrenztemperatur).

#### 4.1.2 Einfluss der adiabatischen Zustandsänderung bei Ziegellochsteinen auf die Temperaturdifferenz

Erster Ansatz der Untersuchung war es, den Effekt einer adiabatischen Befeuchtung bei drei verschiedenen Ziegellochsteinen auf die Temperaturdifferenzen ( $\Delta T$ ) zu untersuchen (Abbildung 12).

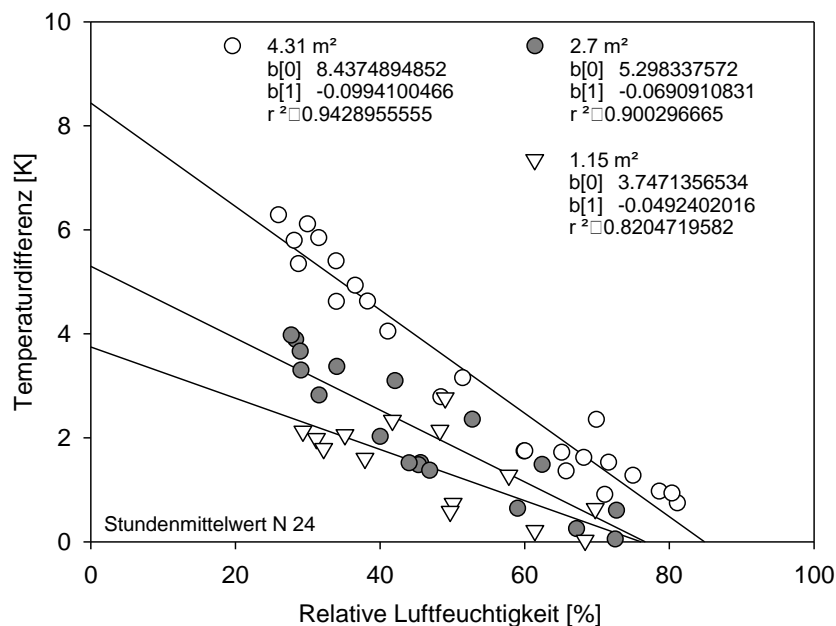


Abbildung 12: Einfluss der Austauschoberfläche von Ziegellochsteinen auf die Temperaturdifferenz ( $\Delta K$ ) in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte der Zuluft. 1 Steinreihe, Luftvolumenstrom  $5000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass die relative Luftfeuchtigkeit ( $r^2$  0,6441) signifikant mit der Temperaturdifferenz korreliert als mit der Außentemperatur ( $r^2$  0,5328). Es wurde festgestellt, dass Ziegellochsteine mit einer Oberfläche von  $4,31 \text{ m}^2$  ( $\Delta T$  6,5 K) die Außentemperatur effektiver abkühlen als Oberflächen mit  $2,7 \text{ m}^2$  ( $\Delta T$  4,1 K) sowie  $1,15 \text{ m}^2$  ( $\Delta T$  2,3 K) bei 30 % relativer

Luftfeuchtigkeit. Mit zunehmender relativer Luftfeuchtigkeit sinkt die Temperaturdifferenz in allen Varianten. Auch LIAO und CHIU (2002) und DAĞTEKIN et al. (2009b) haben festgestellt, dass die Strukturmerkmale einer Austauschoberfläche und die Lochgrößen Auswirkungen auf das Kühlpotential haben. Bei Untersuchungen von MARTÍNEZ et al. (2018) haben die größten Austauschoberflächen auch die maximale Kühleffizienz. WRACHIEN und LORENZINI (2006) fügen hinzu, dass Reibungskräfte die Verdampfungsfraction besonders bei großen Tröpfchen mit Durchmessern über 1 mm erhöhten. Auch die eingesetzten Düsen im Versuch haben grobe Tröpfchen über 1 mm. Der Tropfenradius wird stark vom Systemdruck beeinflusst. Durch den Einsatz von Niederdrucksystemen werden größere Tröpfchenradien erreicht, und der Nutzen wird hauptsächlich durch das Benetzen erhalten. Die Ergebnisse aus Abbildung 12 sind somit übereinstimmend mit der Literatur und den physikalischen Gesetzmäßigkeiten.

Die weiteren Untersuchungen wurden aufgrund der größten erzielten Temperaturdifferenz mit dem Ziegellochstein der Austauschoberfläche von 4,31 m<sup>2</sup> durchgeführt. Wie in den Ausführungen von WARKE und DESHMUKH (2017) beschrieben, ist die Wirksamkeit von Verdunstungssystemen von vielen Faktoren abhängig. Bei der weiteren Betrachtung kann aus Abbildung 13 festgestellt werden, dass die Anzahl an Steinreihen mit -0,2609 und der Luftvolumenstrom um 0,1097 mit der Temperaturdifferenz korrelieren.

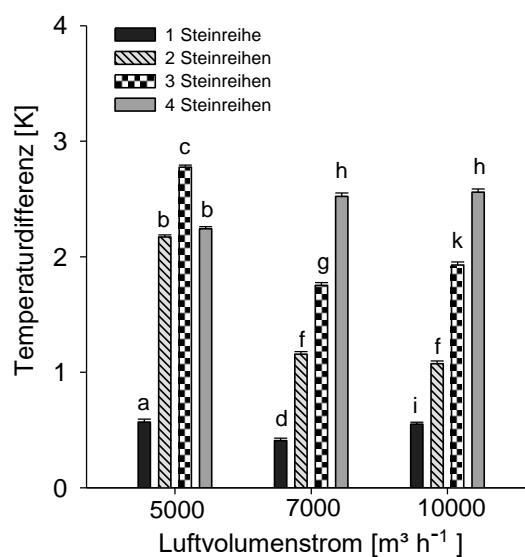


Abbildung 13: Einfluss von Steinreihen und Luftvolumenstrom auf die Temperaturdifferenz. Least Squares Means im Untersuchungszeitraum 14.07-24.08.16. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede Tukey Test (P < 0.05). ± Standardfehler. N=14016.

Die größten Effekte sind bei 3 ( $\Delta T$  2,77) und 4 ( $\Delta T$  2,55) Steinreihen mit  $5000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  sowie  $10000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  signifikant zu beobachten. Bei den Varianten 7000 und  $10000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  sind für jede zusätzliche Steinreihe signifikant höhere Temperaturdifferenzen zu verzeichnen. Für die Variante mit  $5000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  kann festgehalten werden, dass die Erweiterung zusätzlicher Steinreihen von 1 auf 3 die Temperaturdifferenz um 2,20 K signifikant anstieg. Wie bei ALBRIGHT (1990) beschrieben, wird eine kurze Austauschzeit der Luft mit der benetzten Oberfläche als effektiv vermutet. Auch RAWANGKUL et al. (2008) zeigen, dass die Kühleffizienz für verschiedene Pads abnimmt, wenn die Luftgeschwindigkeit zunimmt. In der vorliegenden Studie sind wie bei DAĞTEKIN et al. (2011) große Temperaturdifferenzen bei hohen Luftgeschwindigkeiten zu beobachten. Eine Verdopplung der Oberfläche durch zusätzliche Steinreihen könnte jedoch vorteilhafter sein als eine Erhöhung des Luftvolumenstromes. In der Variante mit  $5000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  liegt die Vermutung nah, dass für 4 Steinreihen zu wenig Luftaustausch stattgefunden hat. In den folgenden Varianten mit 7000 und  $10000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  sind für jede weitere Steinreihe signifikante Temperaturdifferenzen festzustellen. Die Berechnung des Befeuchtungsgrades bestätigt diese Vermutung (Abbildung 14).

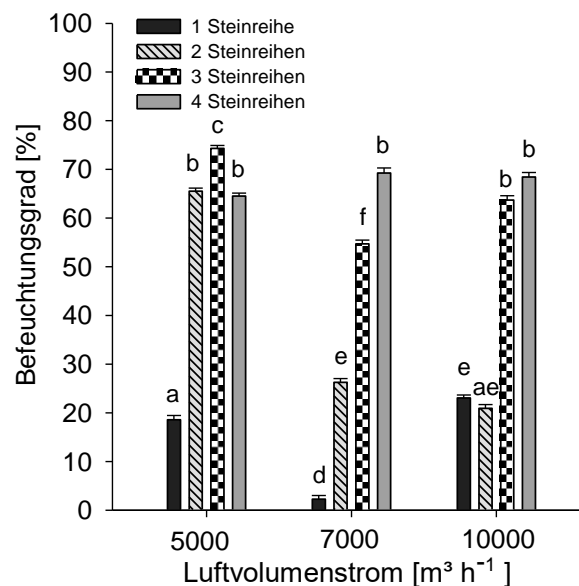


Abbildung 14: Einfluss von Steinreihen und Luftvolumenstrom auf den Befeuchtungsgrad. Least Squares Means im Untersuchungszeitraum 14.07-24.08.16. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede Tukey Test ( $P < 0.05$ ).  $\pm$  Standardfehler.  $N=14016$

Der höchste Befeuchtungsgrad von  $74,30 \pm 0,6265$  % wurde in der Variante  $5000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  und 3 Steinreihen ermittelt. Das Ergebnis unterscheidet sich signifikant von allen anderen Varianten. Erkennbar wurde auch, dass der Befeuchtungsgrad bei jedem Luftvolumenstrom mit 3 und 4 Steinreihen höher war als bei 1 und 2 Steinreihen. Die Variante  $7000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  zeigte das zu erwartende Ergebnis. Je weitere Steinreihe wurde der Befeuchtungsgrad signifikant erhöht. In der Literatur sind kaum Angaben zur Befeuchtung von Ziegellochsteinen vorhanden. Es sind jedoch einige Untersuchungen zu ähnlichen Kühlkissen, vor allem Cellulose- und Kunststoffpad vorhanden. WARKE und DESHMUKH (2017) zeigen in ihren Untersuchungen, dass je dicker das Cellulosepad ist, desto größer ist der Befeuchtungsgrad. Mit zunehmender Luftgeschwindigkeit nimmt die Effizienz ebenfalls ab, obwohl die Konvektion zunimmt (Wärmeübertragungskoeffizient). Sie begründen das mit einer Zunahme der Geschwindigkeit, so dass die Zeit für Wärme- und Feuchtigkeitsaustausch zwischen Wasser und Luft verkürzt ist. KHOND (2011) untersuchte in seinem Experiment verschiedene Oberflächen als Kühlkissen. Mit zunehmender Luftgeschwindigkeit von  $1 \text{ m s}^{-1}$  auf  $3 \text{ m s}^{-1}$  stieg der Befeuchtungsgrad bei allen Materialien an. Dabei hatte im Mittelwert „Wood Wool“ mit 87 % den größten Befeuchtungsgrad vor „Khus Pad“ mit 75 %. Gefolgt von „Coconut Corm“ mit 71 % sowie „Steel wire mech“ mit 50 %. Somit entsprechen die Ergebnisse in Ansätzen den Ausführungen von WARKE und DESHMUKH (2017) und nicht den Beobachtungen von (KHOND 2011). Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass bei jeder zusätzlichen Steinreihe  $9,6 \text{ l h}^{-1}$  mehr Wasser versprüht wurde. Bei den aufgezeigten Untersuchungen der Literatur blieben die Wassermengen konstant. Die Vermutung liegt nah, dass die Variation der Anzahl an Steinreihen einen größeren Einfluss auf den Befeuchtungsgrad hat als der Luftvolumenstrom als solcher.

Eine weitere Einflussgröße zur Beurteilung von Kühlsystemen ist die Kühlleistung. Da es sich um ein adiabatisches Kühlsystem handelt, wo keine Energie hinzu- oder abgeführt wird, wurde hier der theoretische Energiebedarf [kW] errechnet. Aus Abbildung 15 kann folgendes festgehalten werden.

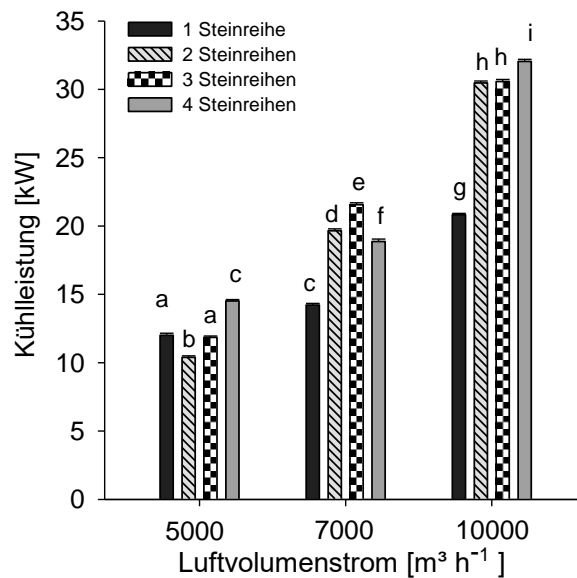


Abbildung 15: Einfluss von Steinreihen und Luftvolumenstrom auf die Kühlleistung. Least Squares Means im Untersuchungszeitraum 14.07-24.08.16. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede Tukey Test ( $P < 0.05$ ).  $\pm$  Standardfehler.  $N=14016$ .

Die Variante  $5000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  zeigt die geringsten berechneten Kühlleistungen bei 2 Steinreihen mit  $10,39 \text{ kW}$ . Die Ergebnisse unterscheiden sich signifikant voneinander. Erkennbar wurde, dass bei steigendem Luftvolumenstrom von  $5000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  ( $12,10 \pm 0,0601 \text{ kW}$ ) auf  $10000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  ( $28,48 \pm 0,0670 \text{ kW}$ ) die durchschnittliche Kühlleistung erwartungsgemäß steigt. Das entspricht einer Steigerung von  $135,37 \%$ . Vergleichbar dazu steigt die Kühlleistung im Durchschnitt von 1 Steinreihe auf 4 ( $15,68 \pm 0,0759 \text{ kW}$  auf  $21,81 \pm 0,09261 \text{ kW}$ ) um  $39,09 \%$  an. Zur Kühlleistung werden meist nur Vermutungen auf den wirtschaftlichen Effekt in der Literatur erwähnt. In Untersuchungen von JEONG und MUMMA (2004) wurden „ceiling radiant cooling panel“ eingesetzt. Bei einem Anstieg der Luftgeschwindigkeit von  $2$  auf  $6 \text{ m s}^{-1}$  stieg die Kühlleistung um durchschnittlich  $23 \%$ . YOON et al. (2018) haben ein System untersucht, das einer herkömmlichen Klimaanlage ähnelt und für Schweineställe geeignet ist. Für eine Temperaturabsenkung von  $3 \text{ K}$  bei einer Luftgeschwindigkeit von  $2,42 \text{ m s}^{-1}$  wird eine Kühlleistung von  $15 \text{ kW}$  benötigt. AKBARI et al. (1997) fügen hinzu, dass bei steigender Außentemperatur die Kühlleistung ansteigt. Es kann festgehalten werden, dass 2 und 3 Steinreihen mit einem Luftvolumenstrom von  $5000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  den niedrigsten Leistungsaufwand hätten.

Parallel zur Kühlleistung sind die Ergebnisse der Druckdifferenzen herzuleiten (Abbildung 16).

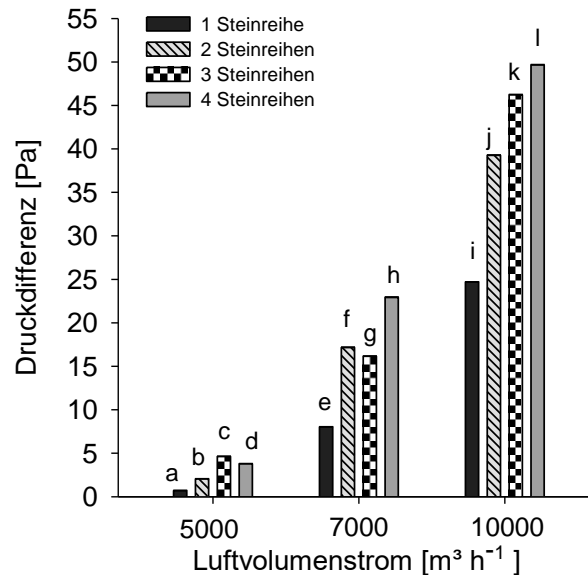


Abbildung 16: Einfluss von Steinreihen und Luftvolumenstrom auf die Druckdifferenz. Least Squares Means im Untersuchungszeitraum 14.07-24.08.16. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede Tukey Test ( $P < 0.05$ ).  $\pm$  Standardfehler.  $N=14016$ .

Die niedrigsten Druckdifferenzen sind in der Variante  $5000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  bei allen 4 Steinreihen festzustellen. Alle Varianten unterscheiden sich signifikant voneinander. Wie zu vermuten, steigen die Druckdifferenzen bei Erhöhung der Luftgeschwindigkeit und Anzahl an Steinreihen tendenziell an. Eine Erhöhung des Luftvolumenstromes von  $5000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  auf  $10000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  führt zu einer durchschnittlichen Druckdifferenzsteigerung von  $2,79 \pm 0,0229 \text{ Pa}$  auf  $39,95 \pm 0,0251 \text{ Pa}$ . Das entspricht einer Druckzunahme von 1331,9 %. Untersuchungen von KOCA et al. (1991) haben gezeigt, dass bei einem 15 cm dickem Cellulosepad ein Druck von 77 Pa bei einer Luftgeschwindigkeit  $2,5 \text{ m s}^{-1}$  festzustellen ist. LIAO et al. (1998) berichten von Druckdifferenzen bei gleichen Cellulosepads von 48 bis 108 Pa sowie bei „Kokosfaser-Material-Pads“ von 60 bis 130 Pa bei Luftgeschwindigkeiten von  $2,0$  bis  $3,0 \text{ m s}^{-1}$ . Es kann festgestellt werden, dass Ziegellochsteine gegenüber herkömmlichen Materialien insgesamt geringe Druckdifferenzen aufweisen. Die Ergebnisse gehen mit der Literatur konform. So wurde bestätigt, wie bei WARKE und DESHMUKH (2017), dass sich mit steigender Luftgeschwindigkeit die Druckdifferenzen erhöhen.



Zusammengefasst lässt sich sagen, dass ein Luftvolumenstrom von  $5000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  mit einer Kombination von 3 Steinreihen am effektivsten war. Für eine durchschnittliche Temperaturabsenkung von  $\Delta T$  2,77 K würden 11,84 kW bei einer durchschnittlichen Druckdifferenz von 4,63 Pa benötigt. Das Ergebnis entspricht einem durchschnittlichen Befeuchtungsgrad von 74,30 %.

Um die Untersuchung zur Temperaturdifferenz weiter zu präzisieren, wurden in Abbildung 17 die Ergebnisse des Luftvolumenstromes und der Anzahl an Steinreihen in Abhängigkeit der Enthalpie der Außenluft dargestellt. Mit zunehmender Enthalpie bis 50-55  $\text{kJ kg}^{-1}$  steigt die Temperaturdifferenz tendenziell in allen 4 Steinvarianten an. In der Variante mit 4 Steinreihen sind bei annähernd gleicher Enthalpie zu den anderen Varianten die höchsten Temperaturdifferenzen bei  $10000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  festzustellen mit ( $\Delta T_{max}$  7,19 K) gefolgt von 3 Steinvarianten mit  $5000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  ( $\Delta T_{max}$  5,91 K).

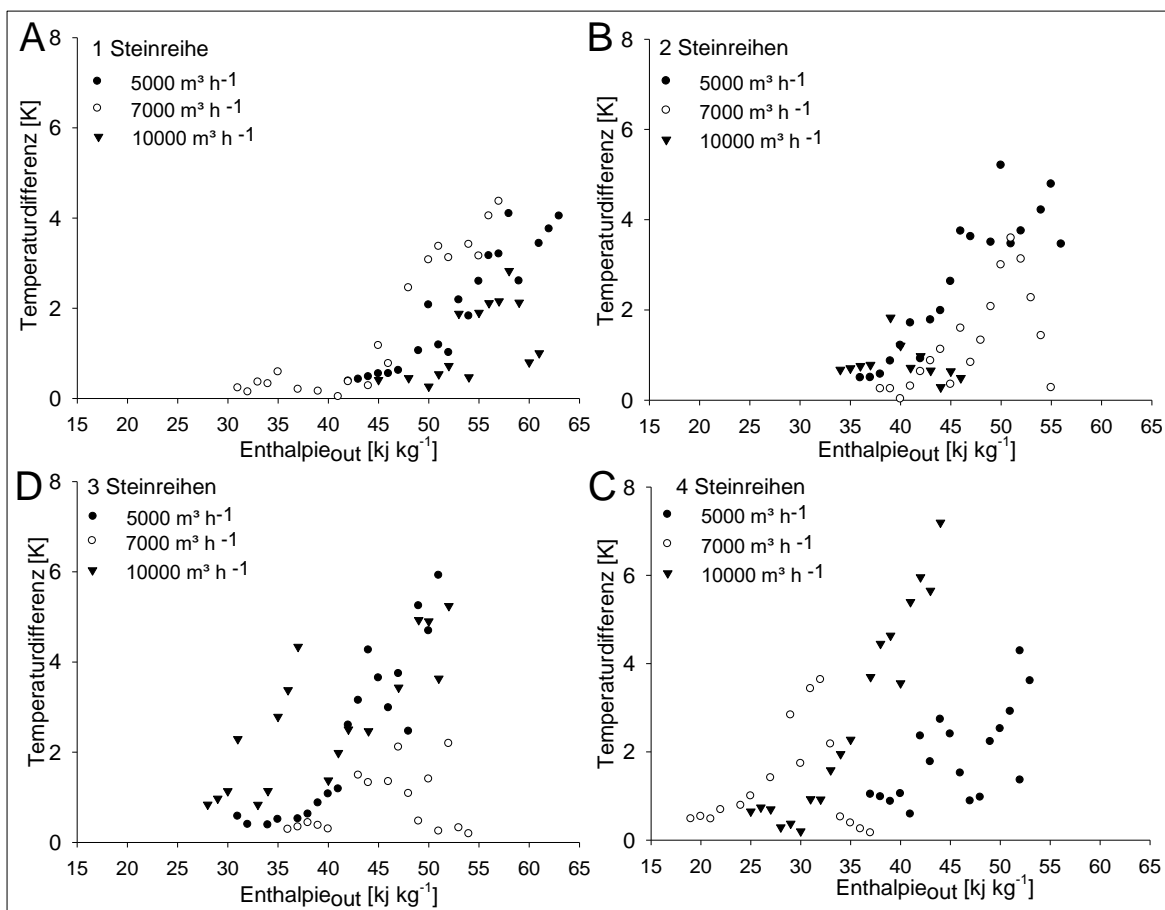


Abbildung 17: Einfluss des Luftvolumenstroms sowie Anzahl an Steinreihen (A, B, C, D) auf die Temperaturdifferenz in Abhängigkeit von der Enthalpie der Zuluft. Untersuchungszeitraum 14.07-24.08.16. N= 611.

## 4.2 Einfluss verschiedener Oberflächen auf die adiabatische Zustandsänderung

Um die Untersuchung weiter zu ergänzen, wurde der Ziegellochstein mit praxisüblichen Cellulose- und Kunststoffpads verglichen. Es wurde ersichtlich, dass sich die verschiedenen Oberflächen sowie der einwirkende Luftvolumenstrom unterscheiden. Bei der Temperaturdifferenz (Abbildung 18) wurde bei dem Cellulosepad die größten Effekte bei einem Luftvolumenstrom  $5000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  von  $3,74 \text{ K}$ , bei Ziegellochstein ( $\Delta T$   $1,35 \text{ K}$ ) und beim Kunststoffpad ( $\Delta T$   $1,15 \text{ K}$ ) gemessen. Die Unterschiede sind signifikant.

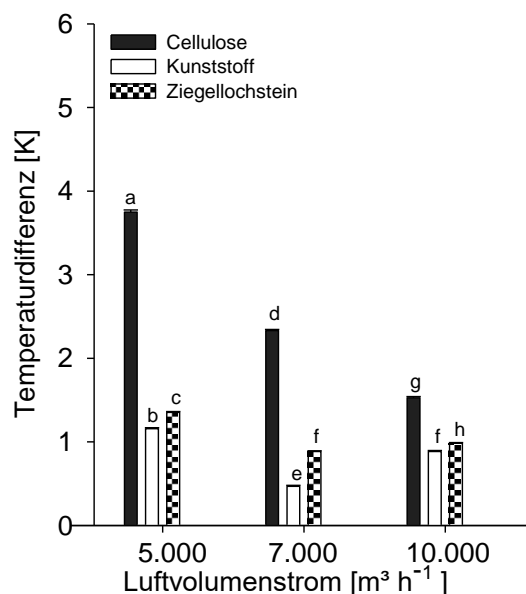


Abbildung 18: Einfluss der Austauschoberfläche auf die Temperaturdifferenz bei variiertem Luftvolumenstrom. Least Squares Means im Untersuchungszeitraum 14.07-24.08.16. 1 Materialreihe. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede Tukey Test ( $P < 0.05$ ).  $\pm$  Standardfehler.  $N=29173$ .

In allen weiteren Varianten sind Ziegellochsteine signifikant gegenüber Kunststoffpads. Bei steigender Luftgeschwindigkeit sinkt die Effektivität der Temperaturdifferenz bei allen Oberflächen. Die Temperaturreduktion bei Cellulosepads betrug bis zu  $4,4 \text{ K}$ , wenn die Düsen sowohl in Innenräumen als auch in der Zuluft platziert wurden (WILSON et al. 1983). In den Untersuchungen von VITT et al. (2017) konnte das Kühlpad mit direktem adiabatischem Kühlsystem  $5,2 \text{ K}$  und das indirekte Kühlsystem um  $3,4 \text{ K}$  die Außentemperatur abkühlen. DAĞTEKIN et al. (2011) beobachteten in ihren Untersuchungen bei der höchsten Luftgeschwindigkeit von  $1,5 \text{ m s}^{-1}$  die größten Kühleffekte. Sie stellen einen signifikanten Zusammenhang

zwischen Temperaturdifferenz und Luftgeschwindigkeit fest. Auch in den Untersuchungen von DAI und SUMATHY (2002) konnte eine Reduzierung der Außenluft von 9 K mit Cellulosepads erreicht werden. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie bestätigen die Ausführungen von DAI und SUMATHY (2002) sowie VITT et al. (2017). Gegensätzlich sind die Beobachtungen von DAĞTEKIN et al. (2011). Zu vermuten ist, dass der Cellulosepad und die Ziegellochsteine gegenüber dem Kunststoffpad das Wasser effizienter aufnehmen und bei geringen Luftgeschwindigkeiten ein effektiverer Austausch mit der Luft stattfindet. Beim Befeuchtungsgrad (Abbildung 19) zeigt sich ein ähnliches Bild.

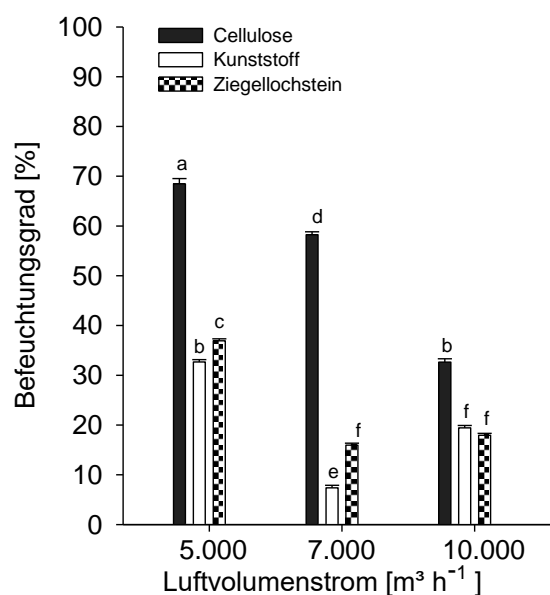


Abbildung 19: Einfluss der Austauschoberfläche auf den Befeuchtungsgrad bei variiertem Luftvolumenstrom. Least Squares Means im Untersuchungszeitraum 14.07-24.08.16. 1 Materialreihe. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede Tukey Test ( $P < 0.05$ ).  $\pm$  Standardfehler.  $N=29173$ .

Der Cellulosepad unterscheidet sich signifikant in der Variante  $5000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  mit  $68,45 \pm 1,0743 \%$  zu Ziegellochsteinen ( $36,92 \pm 0,4124 \%$ ) und Kunststoffpads ( $32,68 \pm 0,4560 \%$ ). Ziegellochsteine unterscheiden sich signifikant in den Varianten  $5000$  und  $7000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  von Kunststoffpads, bei  $10000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  ist kein signifikanter Unterschied ( $P = 0,2782$ ) nachzuweisen. Mit zunehmendem Luftvolumenstrom verringert sich der Befeuchtungsgrad in allen beobachteten Varianten. Beim Befeuchtungsgrad haben LIAO et al. (1998) in ihrer Untersuchung festgestellt, dass Cellulosepads einen Befeuchtungsgrad von  $81 \%$  und „Kokosfaser-Material-Pads“ bis  $92,9 \%$  bei Luftgeschwindigkeiten von  $2$  bis  $3 \text{ m s}^{-1}$  zeigen. WARKE und DESHMUKH

(2017) berichten von Befeuchtungsgraden bei Cellulosepad von 90,37 % (150 mm), „Aspen Pad“ 78,31 % (36 mm) und „Khus Pad“ von 33,72 % (40 mm). AL-SULAIMAN (2002) ermitteln den Befeuchtungsgrad von Verdunstungskissen aus lokalen Fasern bei einer Luftgeschwindigkeit von  $2,5 \text{ m s}^{-1}$  wie „Jutefasern“ (62,1%), „Luffa-Fasern“ (55,1 %), „Palmfasern“ (38,9 %) mit einem Cellulosepad (49,9%). In den Ausführungen von MARTÍNEZ et al. (2018) wird ein Befeuchtungsgrad von 80,5 % bei einem Kunststoffpad mit einer Durchmesser von 250 mm erzielt. Diese Beobachtung erfolgte bei den niedrigsten Luftgeschwindigkeiten. In Untersuchungen von RAWANGKUL et al. (2008) zeigen „Coconut coir“ einen Befeuchtungsgrad im Mittelwert von 50,46 %. Die Ergebnisse von LIAO et al. (1998), in Ansätzen von WARKE und DESHMUKH (2017) sind beim Cellulosepad in der Variante mit  $5000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  übereinstimmen. Die Beobachtungen bei MARTÍNEZ et al. (2018) konnten nicht bestätigt werden. Der Vergleich mit alternativen Kühlkissen zeigt, dass Ziegellochsteine in der Effektivität etwas nachstehen. Bei Cellulosepads sind die Oberflächen kreuzgewellt. Eine Vermischung von Luft und Wasser wird somit maximiert. Der Ziegellochstein ist vermutlich vorteilhafter, weil er gegenüber Kunststoffpads Wasser aufnehmen kann. Die große Oberfläche scheint ebenfalls positive Auswirkungen auf die Kühleffizienz zu haben. Auch FRANCO-SALAS et al. (2010) haben festgestellt: je kleiner die spezifische Oberfläche, desto weniger Kontaktfläche zwischen Wasser und Luft und daher umso weniger Luftsättigungseffizienz.

Die Ergebnisse für die Kühlleistung (Abbildung 20) zeigen, dass bei zunehmendem Luftvolumenstrom die Kühlleistung in allen Varianten ansteigt.

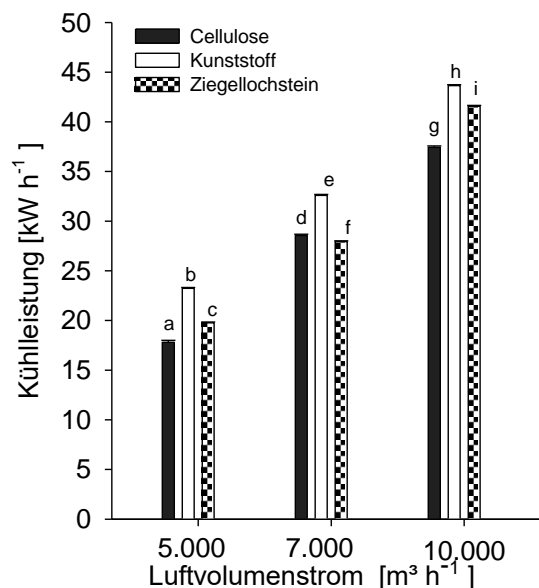


Abbildung 20: Einfluss der Austauschoberfläche auf die Kühlleistung bei variiertem Luftvolumenstrom. Least Squares Means im Untersuchungszeitraum 14.07-24.08.16. 1 Materialreihe. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede Tukey Test ( $P < 0.05$ ).  $\pm$  Standardfehler.  $N=29173$ .

Ersichtlich wurde, dass Cellulose (17,79 kW) in der Variante 5000 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> signifikant gegenüber Ziegellochsteine (19,77 kW) und Kunststoff (23,23 kW) sind. Kunststoffpads zeigen in allen Varianten den höchsten Energieaufwand. FRANCO-SALAS et al. (2010) sowie WARKE und DESHMUKH (2017) haben die maximale Effizienz bei moderaten Geschwindigkeiten beobachtet. Eine steigende Einlassluftgeschwindigkeit führt zu einer höheren Verteilung des Strömungsfeldes am Einlass der Pads sowie höheren Luftwiderstand. KOCA et al. (1991) stellten fest, dass höhere Wirkungsgrade mit dickeren Pads und langsameren Luftgeschwindigkeiten erreicht werden. Den Aussagen der Autoren kann daher zugestimmt werden. Beim Kunststoffpad könnte die Gewebestruktur als Auslöser für einen hohen Energiebedarf vermutet werden.

Bei der Betrachtung der Druckdifferenzen in der Abbildung 21 sind die Aussagen ähnlich zutreffend.

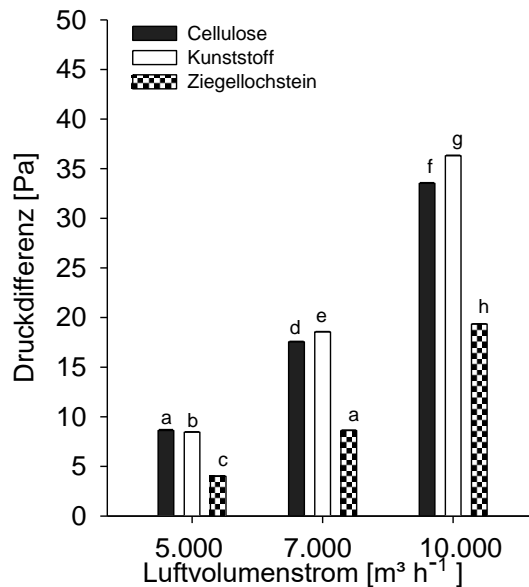


Abbildung 21: Einfluss der Austauschoberfläche auf die Druckdifferenz bei variiertem Luftvolumenstrom. Least Squares Means im Untersuchungszeitraum 14.07-24.08.16. 1 Materialreihe. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede Tukey Test ( $P < 0.05$ ).  $\pm$  Standardfehler,  $N=29173$ .

Die Druckdifferenzen steigen bei jeder Oberfläche mit zunehmendem Luftvolumenstrom an. Der Ziegellochstein (4,75 Pa) hat in der Variante 5000  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$  gegenüber Cellulose (8,77 Pa) und Kunststoff (8,31 Pa) die signifikant geringsten Druckdifferenzen. Eine maximale Druckdifferenz von 17 Pa bei Luftgeschwindigkeiten von  $1,95 \text{ m s}^{-1}$  bei Kunststoffpads haben MARTÍNEZ et al. (2018) festgestellt. FRANCO-SALAS et al. (2010) konnten bei Luftgeschwindigkeiten von 1 bis  $1,5 \text{ m s}^{-1}$  Druckdifferenz von 3,9 Pa bis 11,25 Pa sowie RAWANGKUL et al. (2008) 9,1 und 12,4 Pa bei einer Luftgeschwindigkeit  $4,35$  bis  $5,36 \text{ m s}^{-1}$  bei Cellulosepads feststellen. Mit Erhöhung der Luftgeschwindigkeit durch das Pad, verringert sich die Kühleffizienz. Die kürzere Austauschzeit der Luft mit der Wasser benetzten Oberfläche wird als Ursache vermutet (ALBRIGHT 1990). Die Aussagen der Literatur stimmen weitgehend mit den Beobachtungen der Studie überein. Festzustellen waren tendenziell höhere Druckdifferenzen bei Kunststoffpads. Das könnte daran liegen, dass in der vorliegenden Studie ein Intervall von 30 Sekunden Wasser sprühen und 30 Sekunden Pause fixiert wurde. Wasser könnte somit einen höheren Widerstand darstellen. Diese Ansicht würde mit MARTÍNEZ et al. (2018) übereinstimmen.

Die Temperaturdifferenz ist das wichtigste Leistungsmerkmal zur Charakterisierung von Verdunstungskissenkühlssystemen (WANG et al. 2008). Um die Einflüsse der Temperatur und der Feuchtebelastung der Außenluft gemeinsamen zu betrachten, wurde in Abbildung 22 die Enthalpie der Außenluft dargestellt.

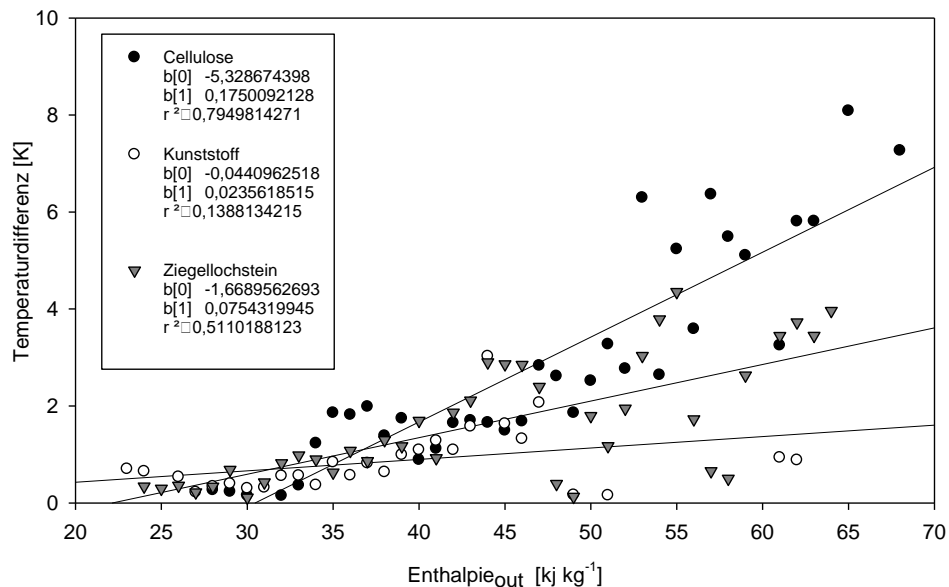


Abbildung 22: Einfluss der Austauschoberfläche auf die Temperaturdifferenz in Abhängigkeit von der Enthalpie der Zuluft. 1 Materialreihe, Luftvolumenstrom: 5000, 7000, 10000 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. ± Standardfehler. Stundenmittelwerte, N 48.

Es wurde ersichtlich, dass Ziegellochsteine, Cellulose- und Kunststoffpads bis zu einer Enthalpie von 42 kJ kg<sup>-1</sup> marginale Unterschiede in der Temperaturdifferenz aufweisen. Bei gleicher Enthalpie zeigt sich das Cellulosepad vorteilhafter gegenüber Ziegellochsteinen und Kunststoffpad. Die Unterschiede in der Temperaturdifferenz waren zwischen Cellulose und Ziegellochstein überwiegend doppelt so groß. VITT et al. (2017) zeigten das bei einer Enthalpie > 55 kJ kg<sup>-1</sup> milder Hitzestress bei Schweinen auftritt. Eine Reduzierung der Temperatur wäre dann essentiell für die Tiere. Aus den Erkenntnissen der vorliegenden Studie würden Cellulosepads und Ziegellochsteine insgesamt vorteilhafter gegenüber Kunststoffpads sein. Die Pads sollten auch widerstandsfähig gegen Zerfall sein und ihre ursprüngliche Form und Faserorientierung beibehalten (SAMER et al. 2015). Beim Cellulosepad ist die Lebensdauer geringer einzuschätzen und die Anschaffungskosten sind höher als Ziegellochsteine. Die Ergebnisse aus der Studie lassen Raum für weitere Forschung an Ziegellochsteinen zu. Es kann festgehalten werden, dass Ziegellochsteine eine Alternative für Kühlkissen sind.

### **4.3 Praxisversuch**

#### **4.3.1 Wetteraufzeichnungen der Wetterstation**

Im gesamten Untersuchungszeitraum wurde eine durchschnittliche Außentemperatur von 12,4 °C ermittelt. Die Spannweite lag bei maximal 33,7 °C sowie minimal -10,6 °C. Unter 0°C Außentemperatur waren 6,5 %, zwischen 0 und 20 °C waren 85 % sowie über 20 °C lagen 8,5 % der ermittelten Stundenmittelwerte. Die relative Luftfeuchtigkeit lag im Mittelwert bei 85,1 %. Die maximale Luftfeuchtigkeit lag bei 100 % und minimal bei 25 %. Zwischen 25 und 80 % der relativen Luftfeuchtigkeit waren 30 % der ermittelten Stundenmittelwerte. Die relative Luftfeuchtigkeit entspricht dabei den Normalverteilungen (ANONYM 2018). Der Mittelwert der Außentemperatur lag leicht über dem zehnjährigen Durchschnitt mit 10,01 °C.

#### **4.3.2 Ergebnisse aus dem Modul**

Das Modul wurde an der Westseite des Sauenstalles in 150 cm Tiefe in die Erde gelassen (Abbildung 8). Aufgrund des hohen Grundwasserstandes war ein tieferes Eingraben nicht möglich. PAAR et al. (1990) weisen darauf hin, dass in 200 cm Tiefe geringere Temperaturschwankungen von 8,2 bis 7,5 °C zu erwarten sind als bei 100 cm. Auch die Zuluft über die Westseite zu ziehen, könnte nachteilig sein (BÜSCHER et al. 2008). Für eine Aktivierung des Befeuchtungssystems wurde in der vorliegenden Studie die Außentemperatur, für das Jahr 2017 ab 21°C und für 2018 ab 20 °C gewählt. Das führte dazu, dass 10,8 % häufiger befeuchtet wurde und die durchschnittliche Temperaturdifferenz der konditionierten Luft im Modul um 0,89 °C niedriger war. Die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit der konditionierten Luft war in beiden Jahren mit ca. 90 % konstant. In den Untersuchungen von HAEUSSERMANN et al. (2007a) wird das Befeuchtungssystem nach der Temperatur (max. 21°C) und relativer Luftfeuchtigkeit (max. 80 %) im Abteil geregelt. Diese Voraussetzung sollten auch für das Modul in zukünftigen Untersuchungen in Erwägung gezogen werden.



### 4.3.3 Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit

Im ersten Versuchszeitraum 2017 wurde an 63 von 103 Tagen adiabatisch befeuchtet. Die Verteilung lag dabei von 2 bis 12 Stunden Befeuchtung pro Tag und summierte sich auf insgesamt 492 Stunden. Im Jahr 2018 wurde 10,8 % häufiger befeuchtet als im Jahr 2017. Im zweiten Versuchszeitraum 2018 wurde an 39 von 57 Tagen adiabatisch befeuchtet. Die Verteilung lag von 1 bis 16 Stunden pro Tag. Insgesamt waren es somit 448 Stunden unter adiabatischer Befeuchtung. Der größte Kühleffekt war hierbei mit 15,9 K zu beobachten. Die Außentemperatur konnte ohne adiabatische Kühlung um 2,36 °C sowie bei zusätzlicher Befeuchtung signifikant um 4,57 °C abgekühlt werden. Gleichzeitig erhöhte sich die relative Luftfeuchtigkeit um 14,94 % im Modul nicht signifikant ( $P = 0,5023$ ) gegenüber keiner adiabatischer Befeuchtung mit 15,64 % (Abbildung 23). Die Korrelation zwischen Befeuchtung und Temperaturdifferenz betrug 0,402 sowie zur relativen Luftfeuchtigkeitsdifferenz 0,439.

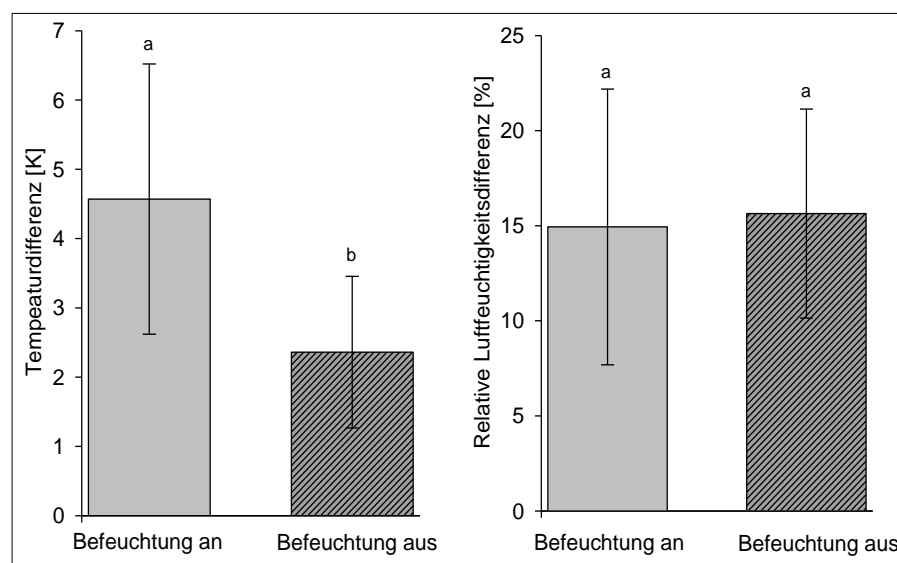


Abbildung 23: Lsmeans der Temperatur- und relativen Luftfeuchtigkeitsdifferenz während aktiver und inaktiver adiabatischer Befeuchtung im Modul.  $\pm$  Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben signalisieren Signifikanzen ( $P > 0,05$ ), Tukey test.

Im gesamten Untersuchungszeitraum wurde an 24,4 % der aufgezeichneten Stunden adiabatisch befeuchtet und damit die Außentemperatur signifikant gekühlt. Sofern die Befeuchtung nicht aktiv war, wurde weiterhin eine Reduzierung der durchschnittlichen Temperaturdifferenz bei einer Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit ermittelt. Es ist zu vermuten, dass Ziegellochsteine ein hohes Wasserspeichervermögen besitzen und nach adiabatischer Befeuchtung einen weiteren Kühleffekt auslösen. Dieser Effekt

spart zusätzliches Wasser und weitere Stromkosten für die Wasserpumpe. Vergleichbare Untersuchungen für Ziegellochsteine, die als Austauschoberfläche für Kühlsysteme dienen, liegen derzeit nicht vor. Es sind jedoch Untersuchungen zu anderen Kühlpads vorhanden. Vor allem Cellulose- und Kunststoffpad (KOCA et al. 1991; WARKE und DESHMUKH 2017). In den Untersuchungen von VITT et al. (2017) konnte das Kühlpad mit direktem adiabatischen Kühlsystem 5,2 K und das indirekte Kühlsystem 3,4 K die Außentemperatur abkühlen. Eine maximale Reduzierung der Temperaturdifferenz von 9 K wurden bei DAI und SUMATHY (2002) und bei HAEUSSERMANN et al. (2007a) von 7 K während adiabatischer Befeuchtung festgestellt. LUCAS et al. (2000) und DAĞTEKIN et al. (2009b) konnten zeigen, dass die Effektivität adiabatischer Kühlsysteme mit zunehmender relativer Luftfeuchtigkeit der Außenluft sinkt. Es zeigt sich, dass Ziegellochsteine den Ergebnissen von bereits etablierten Austauschoberflächen im allgemeinen hinreichend entsprechen. Die maximale Temperaturdifferenz von 15,9 K im Modul konnte in vergleichbaren Versuchen nicht übertroffen werden. Dass die relative Luftfeuchtigkeit während adiabatischer Befeuchtung zunimmt, konnten DAĞTEKIN et al. (2009b) bestätigen.

Repräsentativ für den Untersuchungszeitraum wurde in Abbildung 24 Zeitreihen von 8 Tagen dargestellt. Aus Abbildung 24 A wird ersichtlich, dass Schwankungen bei der Außentemperatur zwischen 26,9 und 6,1 °C festzustellen sind. Von den 168 Stunden während der 8 Tage wurde an 42,85 % adiabatisch befeuchtet. Eine zusätzliche adiabatische Befeuchtung  $T_{\text{out}} > 21$  °C konnte die Außentemperaturen kontinuierlich und maximal um 7,49 K reduzieren. Der eingesetzte Massenstrom Wasser erhöhte sich dazu parallel. Im Jahr 2018 führte die Aktivierung des Befeuchtungssystems bei  $T_{\text{out}} > 20$  °C zu einer maximalen Temperaturdifferenz von 8,8 K (Abbildung 24 B). Zu erkennen war auch, dass der Massenstrom Wasser tendenziell höher liegt als im Vorjahr. Auffällig war, dass nach der adiabatischen Befeuchtung weiterhin Kühleffekte in beiden Jahren auftraten und die konditionierte Luft aus dem Modul eine geringere Temperaturamplitude aufwies. Der Abschnitt in Abbildung 24 C zeigt einen Temperaturverlauf bei dem eine Befeuchtung möglich gewesen wäre. Die konditionierte Luft liegt im Durchschnitt 1,15 K unter der Außentemperatur von 15,86 °C. Bei steigender Außentemperatur ist eine Zunahme der Luftgeschwindigkeit festzustellen. Der Massenstrom Wasser variiert ebenfalls mit der Außentemperatur.

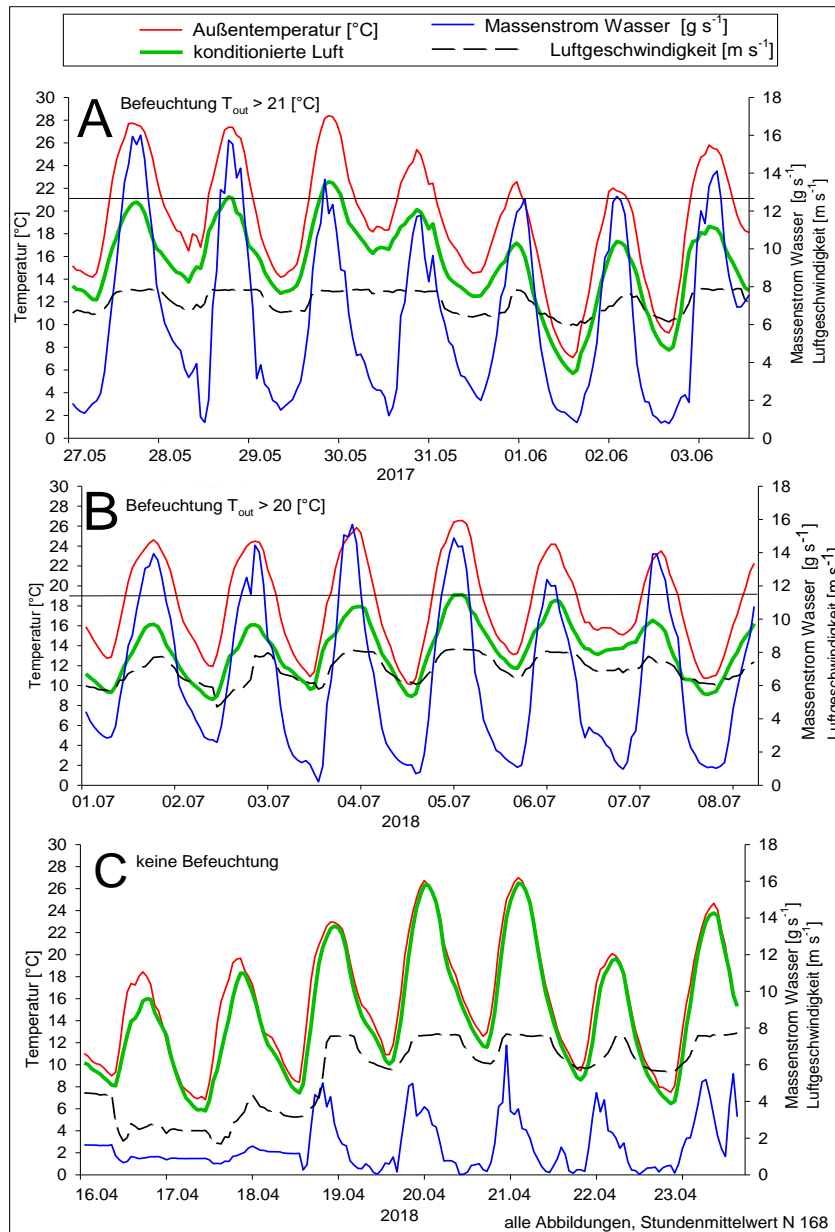


Abbildung 24: Temperaturverlauf der Außenluft und der konditionierten Luft nach dem Modul sowie Massenstrom Wasser und Luftgeschwindigkeit. (A bei einer adiabatischen Befeuchtung  $T_{out} > 21$  °C , B bei  $T_{out} > 20$  °C sowie C ohne adiabatischer Befeuchtung).

Bei Betrachtung mehrerer Messtage wurde ersichtlich, dass bei einer adiabatischen Befeuchtung  $T_{out} > 21$  °C Temperaturspitzen von 28,93 °C auf bis zu 22,57 °C reduziert werden können. Bei gleichzeitigem Anstieg des Massenstroms Wasser der zum einem von der adiabatischen Befeuchtung, zum anderen von der Feuchtebelastung der Außenluft abzuleiten ist. Es bestätigte sich die Annahme, dass Ziegellochsteine Wasser speichern können. Zu jedem Zeitpunkt wurde eine Temperaturreduzierung zur Außenluft gemessen, auch wenn keine adiabatische Befeuchtung aktiv war. Ein möglicher Effekt eines Erdwärmetauschers ist somit nur geringfügig vorhanden. Mit

der Berücksichtigung, dass die Luftgeschwindigkeit während ansteigender Außentemperatur von  $4 \text{ m s}^{-1}$  auf durchschnittlich  $7 \text{ m s}^{-1}$  zunimmt, wäre die Vermutung naheliegend, dass sich die Außentemperatur durch die Luftgeschwindigkeit abgekühlt. Die Beobachtungen stimmen mit AL-SULAIMAN (2002) und FRANCO-SALAS et al. (2010) überein. Sie merken an, dass Verdunstungskühlsysteme am effektivsten wirken, wenn die Temperaturen hoch und die relative Luftfeuchtigkeit gering sind. Dies wäre zu den Mittagsstunden der Fall. Marginale Temperaturdifferenzen bei inaktiven adiabatischen Kühlsystemen konnten ebenfalls bei VITT et al. (2017) festgestellt werden. Nicht übereinstimmend sind die Untersuchungen von VAN CAENEGEM und WECHSLER (2000), HESSEL und VAN DEN WEGHE (2011), BEYERSDORFER und GERMAND (2012) sowie HAENEL et al. (2012) zur Reduzierung der Außentemperatur durch ein Erdwärmetauscherprinzip. Eine mögliche Erklärung beschreibt (DEGLIN et al. 1999). Je besser die Wärmeleitfähigkeit und das Wasserhaltevermögen des Bodens sind, desto effektiver ist der Wärmeaustausch. Somit ist lehmiger Boden wesentlich besser für den Einsatz eines Erdwärmetauschers (ETW) geeignet als sandiger Boden. Daher könnte der sandige Bodentyp am Versuchsstandort nachteilig auf einen möglichen Effekt durch Erdwärme gewirkt haben. Des weiteren weist DEGLIN et al. (1999) darauf hin, dass kleine Austauschoberflächen die Außentemperatur im ETW effektiver reduzieren. Das Modul hat jedoch eine zwei Quadratmeter große Öffnung für die Zuluft und war nicht mit Erde von oben bedeckt.

#### 4.3.4 Befeuchtungsgrad

Aus Abbildung 25 wird die Verteilung der Temperaturdifferenzen zum Befeuchtungsgrad sichtbar. 63,28 % der Messwerte haben einen Befeuchtungsgrad von  $> 80\%$  erreicht. Für die größten Kühleffekte von maximal 9,14 K wurde ein Befeuchtungsgrad von 90,74 % in der Gruppe  $< 50\%$  relativer Luftfeuchtigkeit errechnet.

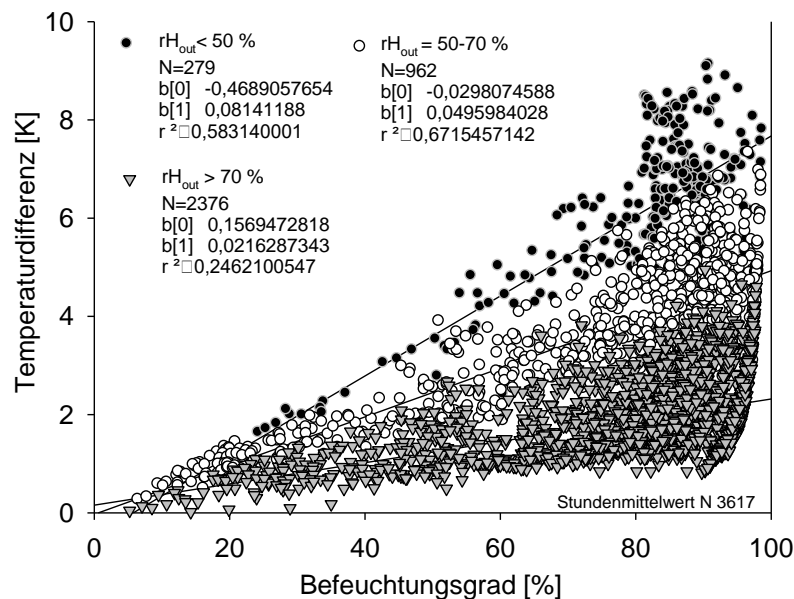


Abbildung 25: Zusammenhang des Befeuchtungsgrades auf die Temperaturdifferenz im Modul bei unterschiedlicher relativer Luftfeuchtigkeit.  $rH_{out}$ = relative Luftfeuchtigkeit.

Der Befeuchtungswirkungsgrad ist ein Schlüsselfaktor bei der Bestimmung der Leistung von Kühlsystemen (ANONYM 2012). Es wurde in der vorliegenden Untersuchung festgestellt, dass insgesamt sehr hohe Befeuchtungswirkungsgrade bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchtigkeiten vorliegen. Das entspricht den vorherigen Ergebnissen. Da eine Temperaturdifferenz während aktiver und inaktiver adiabatischer Befeuchtung festgestellt wurde, könnte eine Annäherung an die Kühlgrenztemperatur vermutet werden. Diese Feststellung ist übereinstimmend mit den Untersuchungen von (DAĞTEKIN et al. 2009b). Die Effizienz der Verdampfungskühlung kann zwischen 60 % und 80 % variieren (HUHNKE et al. 2004; DAĞTEKIN et al. 2009b, 2009b). Auch HAEUSSERMANN et al. (2007a) zeigen bei zunehmender relativer Luftfeuchtigkeit einen abnehmenden Befeuchtungsgrad von 89 % auf 69 %. In den Ausführungen von LUCAS et al. (2000) kann Hitzestress durch Verwendung eines Verdunstungssystems mit einem Befeuchtungsgrad von 80 %

reduziert werden. In Übereinstimmung mit der Literatur kann festgestellt werden, dass eine effektive Befeuchtung im Modul stattgefunden hat. Auch der Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit ist in der Literatur entsprechend beschrieben. Auffällig sind die hohen Spannweiten beim Befeuchtungsgrad. Eine mögliche Erklärung wäre, dass die Außenklimabedingungen (z.B. hohe Temperaturen und hohe relative Luftfeuchtigkeit) die Effizienz minimieren.

### 4.3.5 Enthalpie

Aus der Korrelationsmatrix zur Enthalpie (Kapitel 3.2.4) wurde ersichtlich, dass die relative Luftfeuchtigkeit mit 0,8258 und die Außentemperatur mit 0,6311 signifikant zur Temperaturdifferenz korrelieren. Um beide Einflussfaktoren zusammen zu bewerten, wurde in Abbildung 26 die Enthalpie der Außenluft gewählt. Festzustellen war, dass zusätzlicher Input von Massenstrom Wasser und Luftgeschwindigkeit keine größeren Temperaturdifferenzen zeigte (Abbildung 26 A). In der befeuchteten Variante wurde bei einer Enthalpie von  $36 \text{ kJ kg}^{-1}$  eine maximale Temperaturdifferenz von 7,45 K bei einer Luftgeschwindigkeit von  $7,0 \text{ m s}^{-1}$  und einem Massenstrom Wasser von  $9,37 \text{ g s}^{-1}$  erreicht. In der Variante ohne adiabatischer Befeuchtung unterscheidet sich das Verhältnis, Temperaturdifferenz zu Luftgeschwindigkeit noch deutlicher. Der Massenstrom Wasser verändert sich nur marginal und die Luftgeschwindigkeit steigt linear von  $4 \text{ m s}^{-1}$  auf  $8 \text{ m s}^{-1}$  an. Ohne adiabatische Befeuchtung wurde bei einer Enthalpie von  $39 \text{ kJ kg}^{-1}$  eine Temperaturdifferenz von 2,46 K bei einer Luftgeschwindigkeit von  $6,05 \text{ m s}^{-1}$  und einem Massenstrom Wasser von  $2,91 \text{ g s}^{-1}$  ermittelt.

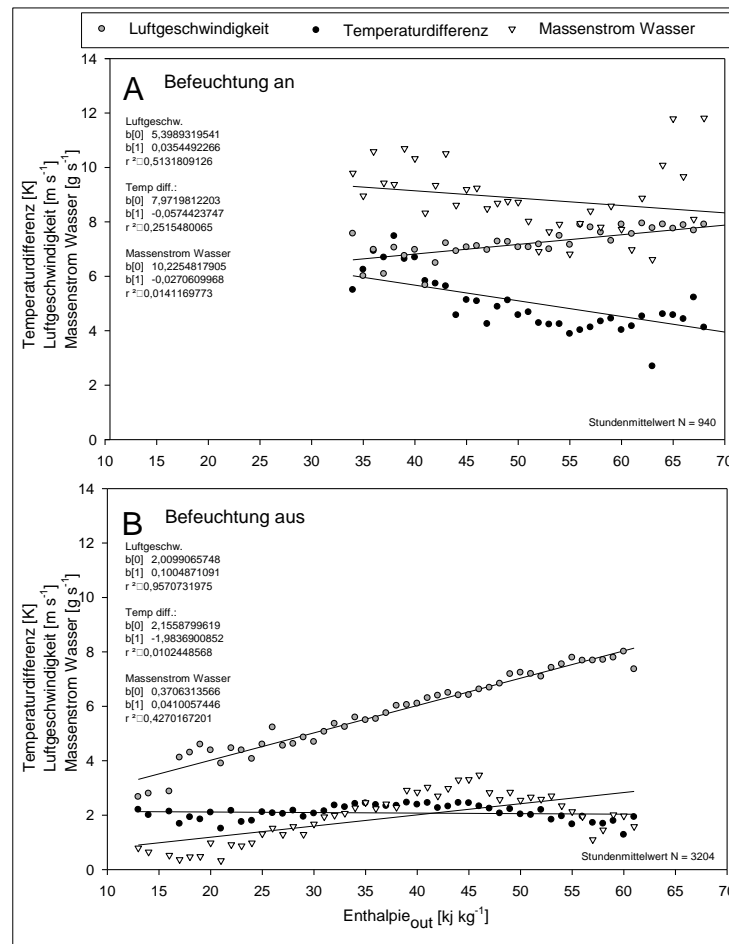


Abbildung 26: Einfluss von Temperaturdifferenz, Luftgeschwindigkeit und Massenstrom Wasser bei (A) aktiver und (B) inaktiver adiabatischer Befeuchtung im Modul während unterschiedlicher Enthalpie der Außenluft (Enthalpie<sub>out</sub>).

Die Enthalpie erwies sich als hilfreich bei der Analyse des Wärmeaustausches (RODRIGUES et al. 2011). Als Komfortindex gibt die Enthalpie die Umweltbedingungen an, die mit Hitzestress für Tiere verbunden sind. Die Enthalpie wird daher als Komfortanzeige für Installationen und Kühlsysteme verwendet (SILVA et al. 2006). Eine effiziente Temperaturdifferenz wurde im Enthalpiebereich der Außenluft von 35 bis 45  $\text{kJ kg}^{-1}$  festgestellt. Anschließend war die Temperaturdifferenz leicht abfallend und stagniert. Parallel dazu, nimmt die Luftgeschwindigkeit und der Massenstrom Wasser zu. Wenn keine adiabatische Befeuchtung aktiv war, stieg die Luftgeschwindigkeit, tendenziell bei steigender Enthalpie an. Ein Zusammenhang zwischen Massenstrom, Wasser und Temperaturdifferenz wurde hierbei nicht beobachtet. Die Temperaturdifferenz pendelt sich im Niveau von  $\pm 2 \text{ K}$  ein. Eine höhere Luftgeschwindigkeit führt dazu, dass die Kontaktzeit zwischen der Luft und der nassen Oberfläche verringert wird, und die Effektivität infolge dessen abnimmt (CAMARGO et al. 2005; WARKE und DESHMUKH 2017). LIAO und CHIU (2002) sowie MARTÍNEZ et al.

(2018) führen hierzu aus, dass sich die Effizienz erhöht, wenn die Kühlkissenstärke oder die Menge an eingeführtem Wasser zunimmt, da die Oberfläche des Wassers, die der Luft ausgesetzt ist, ebenfalls zunimmt. Auch FRANCO-SALAS et al. (2010) zeigen, dass eine effiziente Steigerung von Kühlsystemen mit Zunahme der Menge an Wasser von 1,8 und 2,62 kg h<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> pro Quadratmeter Kühlpad möglich ist. In der vorliegenden Untersuchung kann jedoch keine steigende Effektivität bei einer Abnahme der Luftgeschwindigkeit und Zunahme von Wasser zur Temperaturdifferenz festgestellt werden. Die Ergebnisse von PANG et al. (2011) sind eher zutreffend. Es wird dort darauf hingewiesen, dass ein weiterer Anstieg der Wasserströmungsrate über 4 l min<sup>-1</sup> nur einen geringen Vorteil brachte. Festzuhalten bleibt auch, dass eine adiabatische Befeuchtung die Zuluft durchschnittlich um 2,47 K gegenüber inaktiver Befeuchtung reduzieren kann und dafür durchschnittlich 6,12 g s<sup>-1</sup> mehr Wasser verbraucht wird. Die durchschnittliche Enthalpie der Außenluft lag während adiabatischer Befeuchtung um 11,08 kJ kg<sup>-1</sup> höher als in der nicht befeuchteten Variante.

### 4.3.6 Kühlleistung

Um die Aussagen weiter zu konkretisieren scheint es sinnvoll, eine Bewertung der Kühlleistung vorzunehmen. Für eine maximale Temperaturabsenkung von 5,22 K würde die Energie von 11,46 kW bei adiabatischer Befeuchtung (Abbildung 27) benötigt werden. Ersichtlich wird, dass die theoretische Kühlleistung ab 4 m s<sup>-1</sup> doppelt so hoch ist wie die Temperaturdifferenz, welche danach stagniert. Wird keine adiabatische Befeuchtung eingesetzt, steigt die Temperaturdifferenz von 1,76 K bei 2 m s<sup>-1</sup> auf 2,64 K bei 5 m s<sup>-1</sup> an. Die theoretische Kühlleistung liegt anfangs unter der Temperaturdifferenz und steigt nur marginal an.



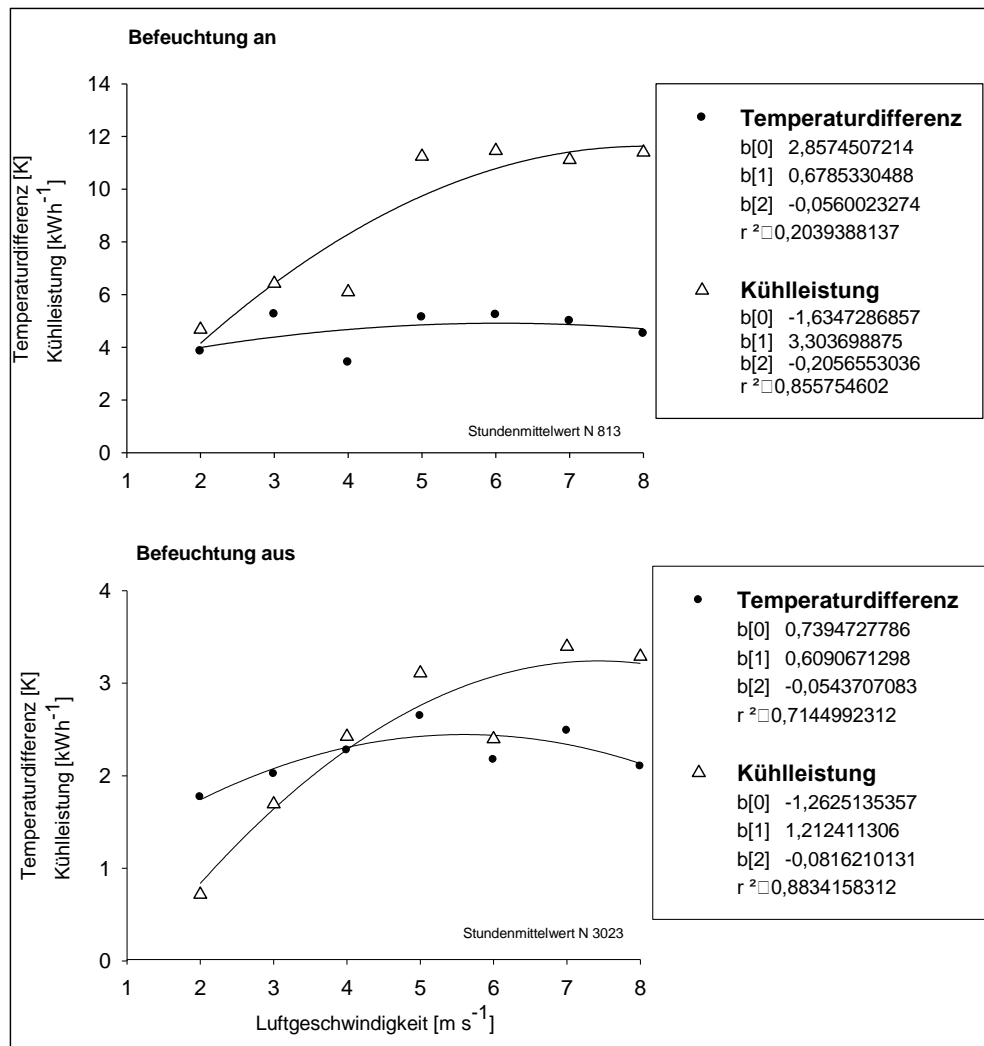


Abbildung 27: Zusammenhang von Kühlleistung und Temperaturdifferenz bei unterschiedlicher Luftgeschwindigkeit und aktiver sowie inaktiver adiabatischer Befeuchtung im Modul.

Bei adiabatischer Befeuchtung kann festgestellt werden, dass eine Temperaturabsenkung von 1 K einer Kühlleistung von 1,92 kW entspricht. Verglichen damit, werden ohne adiabatische Befeuchtung durchschnittlich 2,41 K geringere Temperaturdifferenzen erreicht. Dabei wird für eine Temperaturdifferenz von 1 K eine Kühlleistung von 1,10 kW benötigt. In Ansätzen entspricht das Ergebnis damit den Untersuchungen von (DEGLIN et al. 1999). Dort konnte eine weitere Steigerung der Effektivität des ETW bei einer Reduzierung der Luftgeschwindigkeit von 4 auf 2 m s<sup>-1</sup> um 20 % festgestellt werden. Vergleichend zu den Studien von PAAR et al. (1990) und SAMER (2013) ist die theoretische Energiemenge für das Modul durchschnittlich um 4,22 bzw. 6,4 kW geringer.

#### 4.3.7 Betrachtung des Stallklimas

Das Versuchsabteil (21,86 °C) hatte bei aktiver adiabatischer Befeuchtung gegenüber dem Referenzabteil (23,04 °C) einen signifikanten Temperaturunterschied (Abbildung 28). Ohne adiabatischer Befeuchtung unterscheiden sich die Abteile nicht signifikant voneinander. Die maximale beobachtete Temperaturdifferenz der Stallinnentemperatur zur Außenluft lag im Versuchsabteil 8,7 K niedriger. Die relative Luftfeuchtigkeit war während der adiabatischen Befeuchtung im Versuchsabteil (65,83 %) signifikant höher als im Referenzabteil (54,58 %). Das entspricht einer Zunahme zur durchschnittlichen Außenluft von 11,10 %.

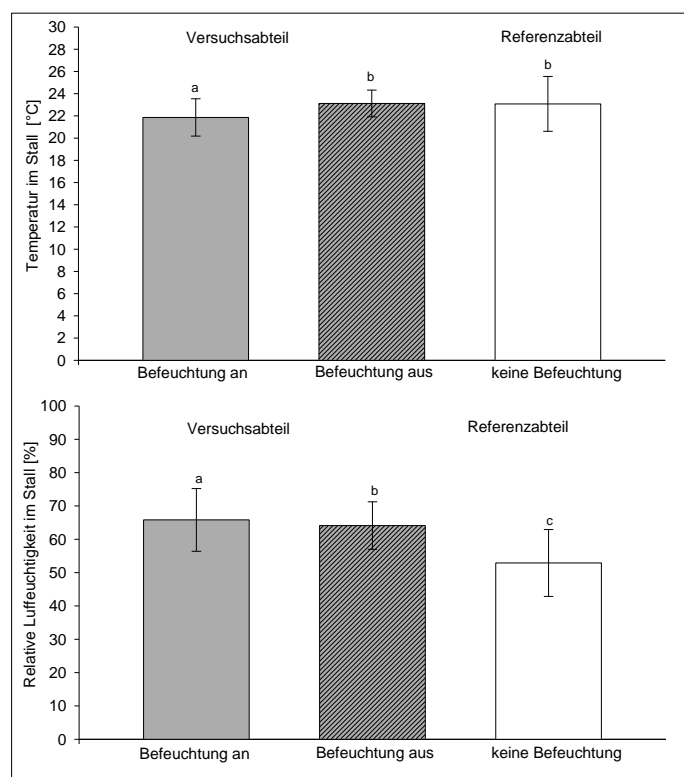


Abbildung 28: Lsmeans für die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit im Versuchs- und Referenzabteil.  $\pm$  Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben signalisieren Signifikanzen ( $P > 0.05$ ), Tukey test.

Eine genaue Betrachtung einer ausgewählten Zeitreihe von 8 Tagen zeigt eine Reduzierung der Temperaturamplitude im Versuchsabteil (Abbildung 29 A). Die Temperatur im Referenzabteil zeigte eine annähernde Parallelität zur Außenluft. Die durchschnittliche Stallinnentemperatur im Versuchsabteil lag bei 20,34 °C und im Referenzabteil bei 21,77 °C. Im Versuchsabteil werden an den Tagen 27. bis 30.05 sowie am 04.06 maximale Temperaturdifferenzen von 4,2 K gegenüber dem

Referenzabteil gemessen. Die Abbildung 29 B repräsentiert eine Situation aus dem Jahr 2018. Bei maximalen Außentemperaturen von 26,5 °C steigt die Innentemperatur im Referenzabteil auf 30,9 °C an. Im Versuchsabteil konnte währenddessen eine Innentemperatur von 25,8 °C durch adiabatischer Befeuchtung erreicht werden. Die Abbildung 29 C zeigt den Temperaturverlauf der Abteile im Frühjahr. Da die Luftführung für das Versuchsabteil generell durch das Modul verläuft konnte ohne adiabatische Befeuchtung eine Temperaturdifferenz von 1,99 K zum Referenzabteil festgestellt werden.

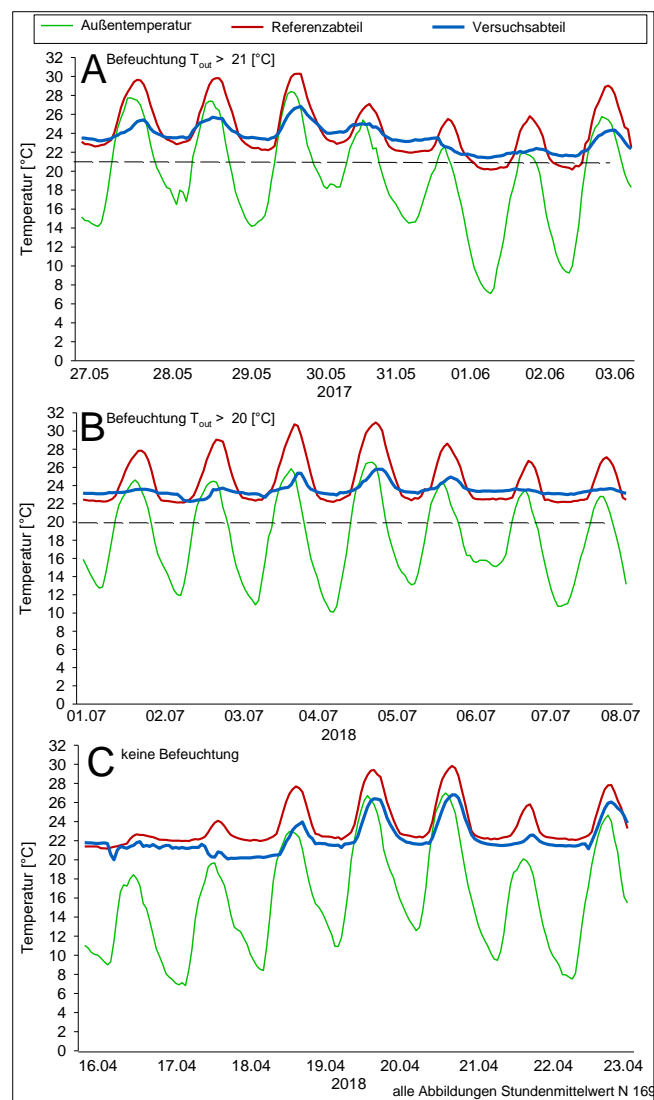


Abbildung 29: Messreihen vom Temperaturverläufen der Außenluft, des Versuchs- und Referenzabteils. (Stundenmittelwerte N=168).

Die Betrachtung des Stallklimas zeigt, dass sich das Versuchsabteil mit einer Temperaturdifferenz von 1,59 K signifikant zum Referenzabteil während adiabatischer Befeuchtung unterscheidet. Die relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsabteil war

signifikant höher, als im Referenz- und Versuchsabteil ohne adiabatischer Befeuchtung. Des Weiteren wurden die Temperaturamplituden und Temperaturspitzen im Versuchsabteil zur Außentemperatur verringert. Die Spannweiten der Stallinnentemperatur im Versuchsabteil lagen bei 18,45 °C und beim Referenzabteil bei 22,90 °C. Es können somit zusammenhängende Effekte der Zuluftkonditionierung aus dem Modul hergeleitet werden. Ersichtlich wurde auch, dass in der Zeit vom 16.04 bis 23.04.2018 das Versuchsabteil ohne adiabatische Befeuchtung eine Temperaturdifferenz von 1,99 K zum Referenzabteil zeigt. Ein Zusammenhang aus Abbildung 24 lässt die Vermutung zu, dass Ziegellochsteine Wasser speichern, eine Konvektion durch das Modul vorliegt und somit die Temperatur absinkt. Denkbar wäre auch die Annahme, dass sich die Zuluft für das Referenzabteil im Stalldachraum mehr aufwärmt, als die Zuluft aus dem Modul. Das empfohlene Optimum der Lufttemperatur für trächtige Sauen liegt nach BLACK et al. (1993) und BOTTO et al. (2014) bei 12 bis 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50-75%. QUINIOU und NOBLET (1999) erwähnen, dass Temperaturen über 25 °C zu Leistungseinbußen bei Sauen führen.

Im Praxisbetrieb wurde eine Solltemperatur im Abteil von 21 °C ( $\pm 0,5$  K Hysterese) vorgegeben. Somit sind die Anforderungen der Stallinnentemperatur nach BLACK et al. (1993) und BOTTO et al. (2014) kaum einzuhalten. Entsprechend der Untersuchung von QUINIOU und NOBLET (1999) konnten Temperaturspitzen im Versuchsabteil abgemildert werden, so dass die durchschnittlich Tagestemperatur unter 25 °C verblieb. Die gemessene relative Luftfeuchtigkeit entspricht im allgemeinen den Angaben der Literatur. Es wurde auch bei HUYNH et al. (2005) darauf hingewiesen, dass die Umgebungstemperatur einen größeren Einfluss auf die physiologischen Merkmale wie Tageszunahme, Gewicht und Körpertemperatur der Tiere hat, als die relative Luftfeuchtigkeit. Das bestätigt auch (PANG et al. 2011).

#### 4.4 Einfluss einer Zuluftkonditionierung im Abferkelstall auf das Stallklima während der Säugezeit

Die Abbildung 30 zeigt den Kühleffekt im Versuchsabteil gegenüber dem Referenzabteil beispielhaft für den 15.08.2017. Bei einer Außentemperatur von 25 °C sind im Referenzabteil (A) durch die Wärmebildkamera die Decke orange, die Wände und der Boden violett eingestuft. Im Versuchsabteil (B) sind dagegen alle Wände sowie die Decke mit blau und ansatzweise mit hellgrün kategorisiert.

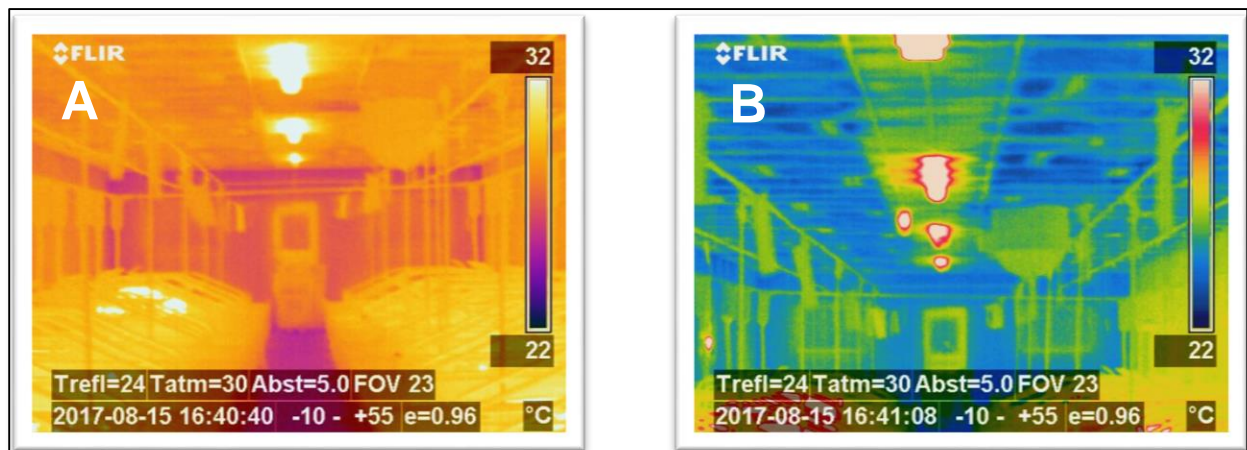


Abbildung 30: Wärmebild des Referenzabteils ohne adiabatische Befeuchtung (A) und Versuchsabteil mit adiabatischer Befeuchtung (B) am 15.08.2017 um 16:40 Uhr. Aufnahmegerät: FLIR, Modell: T865 14°.

Mit Hilfe von Thermogrammen können Haltungsbedingungen hinsichtlich Hitzestress bewertet werden (WARRISS et al. 2006). Auch zur Überprüfung von Kühlsystemen findet diese Methode Anwendung. In Untersuchungen von CALDARA et al. (2014) wird erkennbar, dass ein Wasserverdunstungssystem im Abteil die Oberflächen effektiv abkühlt. Auch NÄÄS et al. (2014) bewerten die Oberflächentemperatur als wichtiges Hilfsmittel in der Schweinehaltung. In der vorliegenden Studie ist die gleichmäßige niedrige Oberflächentemperatur in Abbildung 30B positiv zu bewerten. Die dargestellten Ergebnisse bestätigen somit die Aussagen der Literatur. Da die Farbskalen nicht genormt sind, ist das Ergebnis als Trend zu verstehen.

### 4.4.1 Temperatur-Luftfeuchtigkeitsindex

Die Ergebnisse zum THI aus dem Durchgang 3 und 4 zeigen in Abbildung 31 ein schlüssiges Bild. Im Referenzabteil sind insgesamt 137 und im Versuchsabteil 13 Stunden im Bereich 79-84 zu klassifizieren. Im Durchgang 4 sind im Referenzabteil 24 Stunden im Bereich <84 festgestellt worden. Dabei wurden die maximalen Werte innerhalb 12 und 22 Uhr sowie zwischen dem 4. und 9. sowie 16. und 20. Zyklustag ermittelt.

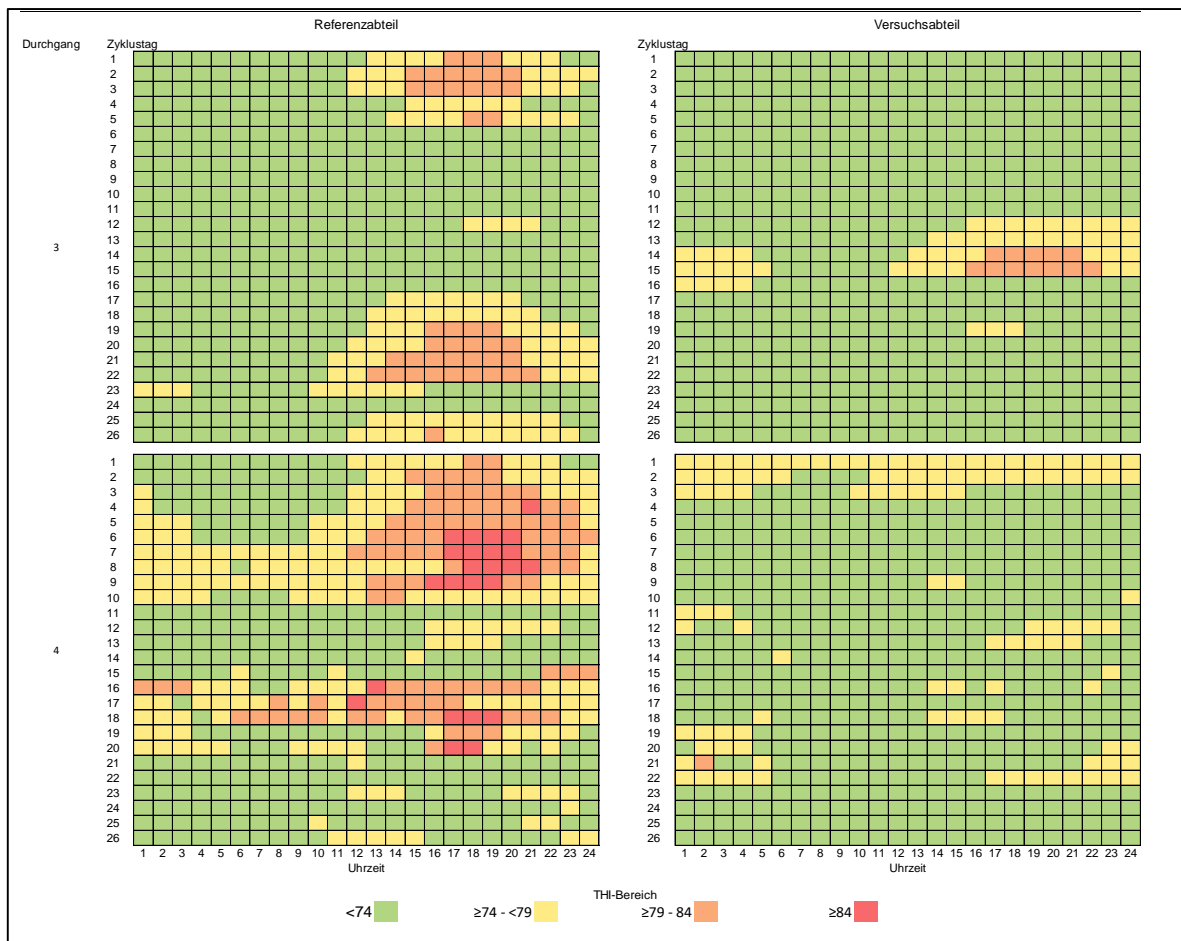


Abbildung 31: Temperatur humidity Index (THI) im Referenz- und Versuchsabteil während der Durchgänge 3 und 4. Unterschiedliche Farben skalieren THI-Bereiche: <74 normal; >74-<79 alarmierend; >79-84 gefährlich; >84 katastrophal.

Die Untersuchungen zeigen in Abbildung 32 für den 5. und 6. Durchgang ein ähnliches Bild. Im Referenzabteil sind insgesamt 169 Stunden im Bereich 79-84 und 63 Stunden im Bereich <84 zu klassifizieren. Dabei sind die maximal ermittelten Werte zwischen 12 Uhr und 23 Uhr sowie vom 1. bis 11. und vom 16. bis 25. Zyklustag festzustellen. Im Versuchsabteil sind während der Durchgänge 5 und 6 keine Werte >79 zu erkennen.

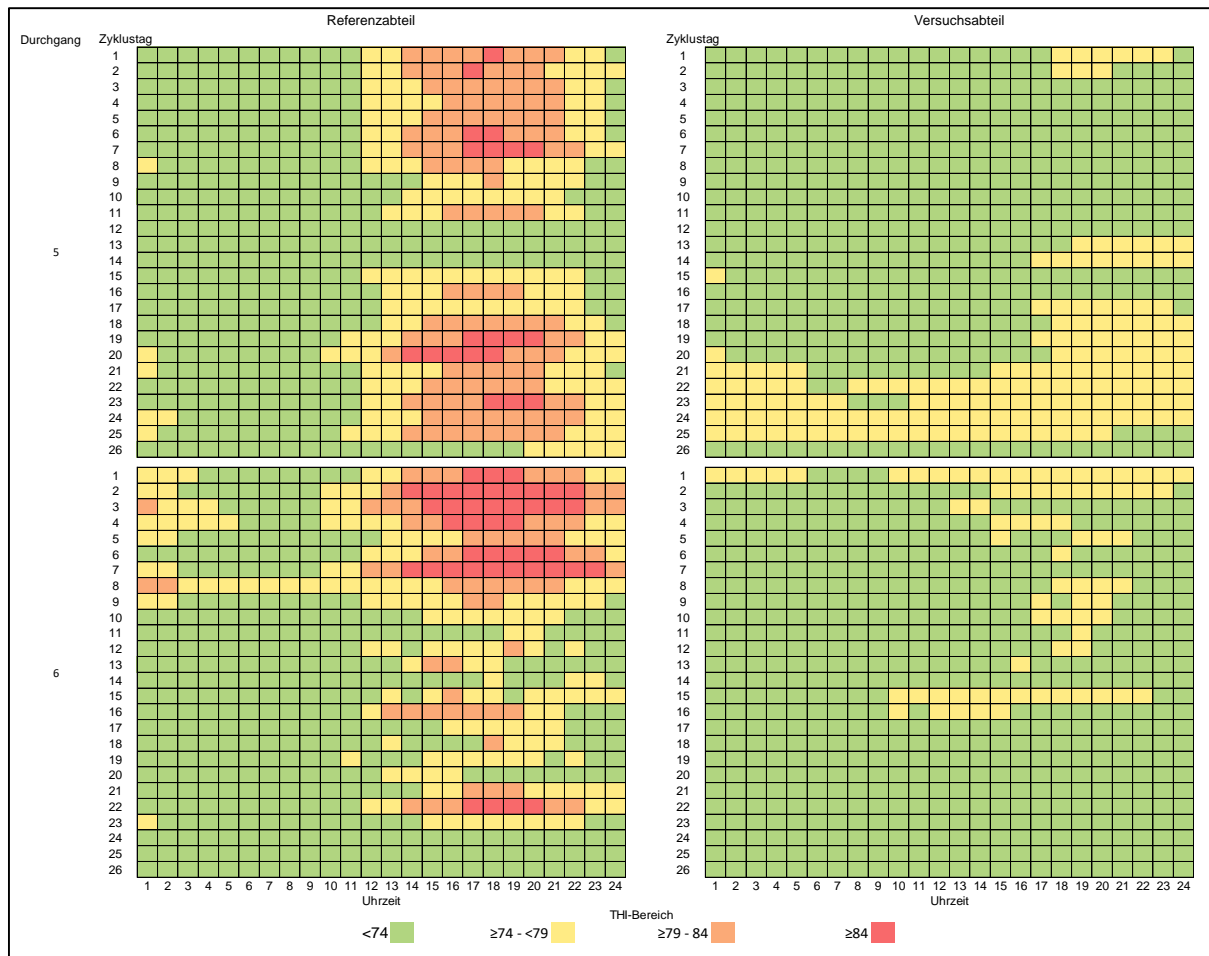


Abbildung 32: Temperatur humidity Index (THI) im Referenz- und Versuchsabteil während der Durchgänge 5 und 6. Unterschiedliche Farben skalieren THI-Bereiche: <74 normal; >74-<79 alarmierend; >79-84 gefährlich; >84 katastrophal.

Der THI konnte in dem Versuchsabteil durch die Zuluftkonditionierung des Moduls gegenüber dem Referenzabteil verbessert werden. Im Referenzabteil sind 12,2 % der ermittelten Werte im Bereich „gefährlich“ und 3,4 % „katastrophal“ einzuordnen. Im Versuchsabteil sind 0,5 % der Daten im Bereich „gefährlich“ festzustellen. Die Untersuchung von HAEUSSERMANN et al. (2007b) und HAEUSSERMANN et al. (2007a) stimmen mit der vorliegenden Studie überein. Auch LUCAS et al. (2000) und BOTTO et al. (2014) berichten von einer Reduzierung des THI wenn ein adiabatisches Kühlsystem im Zuluftkanal installiert ist, obwohl die relative Luftfeuchtigkeit im Abteil anstieg. Die Zunahme der latenten Wärme (Feuchtigkeit) entspricht der Abnahme der fühlbaren Wärme (VITT et al. 2017). Der Anstieg des THI zum Nachmittag ist durch die steigende Außentemperatur und gleichzeitig Erwärmung der Gebäudehülle zu erklären. Während der Durchgänge 5 und 6 kommt es im Referenzabteil vor, dass der THI innerhalb 5 und maximal 14 Stunden am Tag im Bereich „gefährlich“ anhält,

während im Versuchsabteil diese Beobachtungen nicht gemacht wurden. Es ist davon auszugehen, dass bei den Sauen im Referenzabteil körperliche Belastungen durch Hitzestress vorlagen. Im Versuchsabteil wird den Sauen ein konstanteres Klima geschaffen und sie müssen sich nicht an unterschiedliche Klimabedingungen anpassen, wodurch körperliche Belastungen verringert werden können. Untersuchungen von BULL et al. (1997) haben gezeigt, dass wenn Sauen die Wahl haben, Sie Räume mit Kühlkissen vor Tropfkühler und Schnauzenkühler bevorzugen. WEGNER et al. (2016) merken an, dass ein hoher THI zu negativen Auswirkungen auf die Fortpflanzungsleistung der Sauen führt.

#### 4.4.2 Beurteilung der Ferkelgewichte

Die Untersuchungen zu den Ferkelgewichten am 20. Zyklustag aus Abbildung 33 zeigen signifikante Unterschiede im 1. und 4. sowie im 5. Durchgang zwischen dem Versuchs- und Referenzabteil. Die Ferkelgewichte unterscheiden sich dabei um 0,7 kg, 1,2 kg und 0,8 kg.

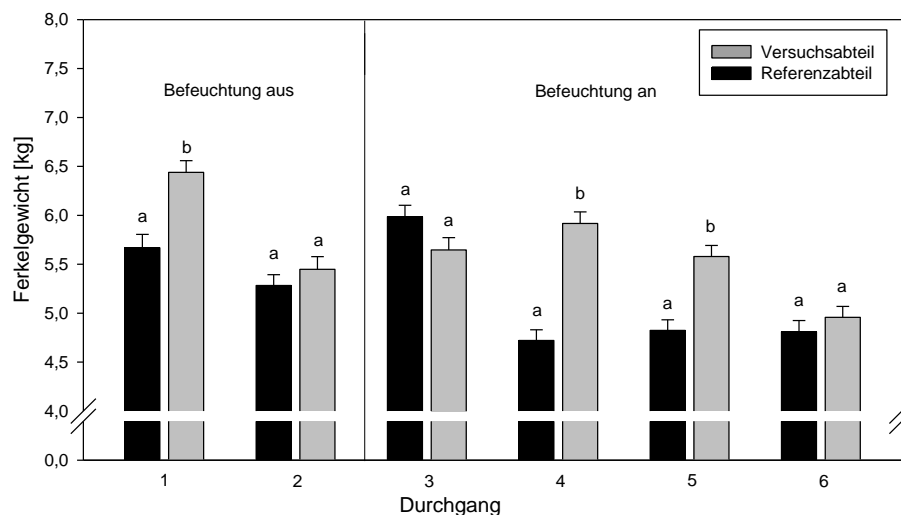


Abbildung 33: Lsmeans der Ferkelgewichte am 20. Zyklustag im Versuchs- und Referenzabteil. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede. (N 1795) ( $P > 0,05$  Tukey Test;  $\pm$  Standardfehler).

Im 1. und 2. Durchgang sind im Referenzabteil durchschnittliche Ferkelgewichte von 5,45 kg und im Versuchsabteil von 5,80 kg ermittelt worden. Während der adiabatischen Befeuchtung vom 3. bis zum 6. Durchgang wurden im Referenzabteil durchschnittliche Ferkelgewichte von 5,05 kg sowie im Versuchsabteil von 5,75 kg



erreicht. Zu beobachten war auch, dass im 3. Durchgang die Ferkelgewichte im Referenzabteil höher als im Versuchsabteil während der Befeuchtung waren. Aus den Untersuchungen von MCGLONE et al. (1988b) geht hervor, dass hohe Temperaturen und Hitzebelastung im Abferkelstall zu niedrigen Absetzgewichten führen. PRUNIER et al. (1997) stellten in ihren Untersuchungen fest, dass die Wachstumsrate bei Ferkel um 18 % niedriger lag wenn die Umgebungstemperatur 30 anstatt 20°C war. Auch BLACK et al. (1993) haben bei einer Erhöhung der Umgebungstemperatur von 18 auf 25 °C bei laktierenden Sauen eine Reduzierung der Milchleistung von 25 % und der Futteraufnahme bis zu 40 % festgestellt. KING (2000) fügen hinzu, dass eine Verringerung der Futteraufnahme die primäre Antwort ist, um die Wärmeproduktion in der laktierenden Sau bei höheren Umgebungstemperaturen zu regulieren. Es wird auch vermutet, dass hohe Umgebungstemperaturen zu niedrigeren Säugezeiten für die Ferkel führen und somit das Absetzgewicht sinkt (STANSBURY et al. 1987; RENAUDEAU und NOBLET 2001). WOLTER und ELLIS (2001) fügen hinzu, dass niedrige Absetzgewichte zu geringeren Wachstumsraten während der anschließenden Ferkelaufzucht führen. FANGMAN et al. (1996) kamen zu dem Schluss, dass ein durchschnittliches Absetzgewicht von 5 kg für abgesetzte Schweine zwischen 16 und 23 Tagen ein gewünschtes Ziel wäre. MAIN et al. (2004) hatten in ihren Untersuchungen ein Absetzgewicht nach 21 Tagen von 5,75 kg. In den Untersuchungen von MCGLONE et al. (1988b) waren die Absetzgewichte um 0,6 kg höher, wenn die Umgebungstemperatur 23,6 anstatt 30,3 °C waren. In der vorliegenden Studie wurde in 5 von 6 Durchgängen ein tendenziell höheres Absetzgewicht im Versuchsabteil gegenüber dem Referenzabteil festgestellt. Die Ferkelgewichte am 20. Zyklustag entsprechen dabei den Angaben der Literatur. Die Vermutung liegt nah, dass die konditionierte Zuluft im Versuchsabteil positive Einflüsse auf die Absetzgewichte der Ferkel hatte, unter der Berücksichtigung, dass 2 von 4 Durchgängen während der adiabatischen Befeuchtung Signifikanzen aufwiesen.

#### 4.4.3 Auswertung des Sauenplaners

Es wurden keine signifikanten ( $P > 0,05$ ) Unterschiede bei der Auswertung der lebendgeborenen und abgesetzten Ferkel aus dem Sauenplaner in Tabelle 6 festgestellt. In den ersten beiden Durchgängen wurden im Durchschnitt 17,72 Ferkel im Referenz- und im Versuchsabteil 17,42 Ferkel lebend pro Sau und Wurf geboren. Während der adiabatischen Befeuchtung vom 3. bis zum 6. Durchgang wurden im Referenzabteil durchschnittlich 17,83 sowie im Versuchsabteil 17,57 Ferkel lebend/Sau und Wurf geboren. Bei den abgesetzten Ferkeln pro Sau und Wurf wurden in den ersten beiden Durchgängen durchschnittlich 12,85 im Referenz- und 13,50 im Versuchsabteil festgestellt. In den folgenden Durchgängen wurden 13,96 im Referenz- und 13,72 im Versuchsabteil abgesetzte Ferkeln / Sau und Wurf erfasst.

Tabelle 6: Lsmeans der lebendgeborenen und abgesetzten Ferkel / Sau und Wurf im Versuchs- und Referenzabteil. Keine signifikanten Unterschiede. ( $P > 0,05$  Tukey Test). N = 4508.

Durchgang	lebendgeborene Ferkel / Sau und Wurf		abgesetzte Ferkel / Sau und Wurf		
	Abteil	Referenz-abteil (n 129)	Versuchs-abteil (n 126)	Referenz-abteil (n 129)	Versuchs-abteil (n 126)
1		19,35	17,52	11,63	12,96
2		16,10	17,42	14,08	14,05
3		17,98	17,90	13,77	13,79
4		16,98	18,41	14,33	13,46
5		17,06	17,23	14,09	13,72
6		19,30	16,75	13,65	13,92

Bei der Auswertung der Ferkelverluste aus dem Sauenplaner in Tabelle 7 wurden keine signifikanten ( $P > 0,05$ ) Unterschiede während der 6 Durchgänge festgestellt. Im Referenzabteil wurden: 9 Ferkel mehr getötet und erdrückt, 1 Kümmerer weniger sowie 17 Verluste ohne Angabe gegenüber dem Versuchsabteil festgehalten.

Tabelle 7: Ferkelverluste während des Untersuchungszeitraumes im Versuchs- und Referenzabteil. Sauen mit Ferkelgewichten. Kein signifikanter Unterschied. ( $P > 0,05$  Tukey Test).  $N = 4508$ .

Verlustgrund	Abteil	
	Referenzabteil	Versuchsabteil
getötet	35	44
erdrückt	52	43
Kümmerer	43	44
keine Angabe	21	4
Verlust gesamt	135	120

Die Fruchtbarkeitsleistung einer Sauenherde ist von vielen Einflüssen abhängig. Neben dem Management, der Genetik, dem Haltungssystem und der Hygiene spielt das Stallklima eine wichtige Rolle (WEGNER 2014). Sauen haben eine viel größere Wärmeproduktion als noch vor 30 Jahren und sind dadurch anfälliger für Hitzestress (MASKAL et al. 2018). Die Produktivität der laktierenden Sau nimmt mit steigender Stallinnentemperatur ab (KING 2000). Dies hat zur Folge, dass die Futtermittelaufnahme und die Milchleistung reduziert, und die Ferkelmortalität steigt (MCGLONE et al. 1988b; SCHOENHERR et al. 1989). LARRIESTRA et al. (2006) merken an, dass ein Absetzgewicht von mindestens 3,6 kg / Ferkel die Mortalitätsrate bei den Saugferkeln minimierte. In Untersuchungen von STANSBURY et al. (1987) wurden 7 bis 8 % verminderte Ferkelverluste bei 25 °C gegenüber 30 °C festgestellt. SPENCER et al. (2003) stellen fest, wenn die Umgebungstemperatur von 21 auf 32 °C verringert wird, ist die nachfolgende Wurfgröße, das Wurfgewicht und die Lebendgeburtenszahl sowohl für die Jungsau als auch für die älteren Sauen signifikant. Auch WEGNER et al. (2014) und SURIYASOMBOON et al. (2006) bestätigen, dass hohe Temperaturen und THI während der Abferkelung zu größeren Verlusten bei den Saugferkeln führen. Im weiteren Verlauf war kein Zusammenhang zwischen hohen THI-Werten und der Mortalität von Ferkeln festzustellen. Die Auswertung zu den lebend geborenen und abgesetzten Ferkeln / Sau und Wurf zeigen im Durchschnitt der gesamten Untersuchung ein homogenes Verhältnis zwischen Referenz- und Versuchsabteil. Die festgestellten Unterschiede während der 6 Durchgänge sind nicht signifikant und zeigen keine Tendenz. Während des gesamten Untersuchungszeitraums liegt die Ferkelverlustrate im Referenzabteil bei 6,01 % und im Versuchsabteil bei 5,3 %. Die dargestellten Merkmale aus dem Sauenplaner repräsentieren nicht eindeutig den Kenntnisstand der Literatur und der Hypothese der Arbeit. Die Mutmaßung, dass der Einfluss des

Managements an dem Betriebsstandort höheren Einfluss auf die Leistungsdaten der Sauen hat als das Stallklima, kann an dieser Stelle nicht belegt werden. Der Betriebsleiter strebt einen Wurfausgleich innerhalb des Abteiles bis zum 4. Lebenstag der Ferkel an. Auch das hohe Leistungsniveau der Sauenherde mit geringen Ferkelverlusten deuten auf eine intensive Betreuung durch den Betriebsleiter hin. Eine frühestmögliche Kreuzung von Ferkeln zwischen Würfen um die Anzahl der Ferkel pro Wurf auszugleichen um somit die Variation des Geburtsgewichts zu minimieren beschreiben STRAW et al. (1998) ebenfalls als erfolgreich. Weitere Maßnahmen durch das Management wie der Einsatz von Milchaustauscher, Prestarter, Medikamente, usw. wurden an dieser Stelle nicht erfasst und sollten in nachfolgenden Studien Berücksichtigung finden.

#### 4.4.4 Luftvolumenstrom

Aus Abbildung 34 wird ersichtlich, dass der Luftvolumenstrom in allen 6 Durchgängen signifikant unterschiedlich zwischen Versuchs- und Referenzabteil ist. Die Unterschiede zwischen den Abteilen sind im ersten Durchgang 129 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> bzw. im zweiten 248 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. Vom dritten bis zum sechsten Durchgang sind folgende Abweichungen festzustellen: 555 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, 466 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, 696 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> sowie 748 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. Im gesamten Untersuchungszeitraum benötigt das Referenzabteil durchschnittlich 2900 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> und das Versuchsabteil 2427 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> Luftvolumenstrom.

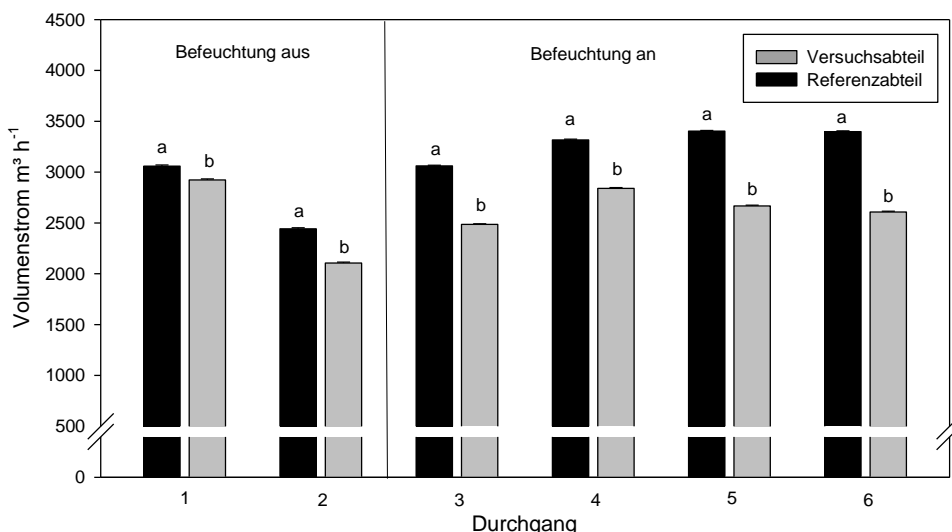


Abbildung 34: Lsmeans für den Volumenstrom in m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> während der Durchgänge 1 bis 6 im Referenz- und Versuchsabteil. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede. (N 1795) (P>0,05 Tukey Test; ± Standardfehler).

Eine effiziente Kühlung ist nach MASKAL et al. (2018) auch von der Abluftrate im Abteil abhängig. HAEUSSERMANN et al. (2007b) berichten von 25 % Energieeinsparung beim Ventilator, wenn ein Kühlsystem die Zuluft konditioniert. Während der adiabatischen Befeuchtung vom dritten bis zum sechsten Durchgang nimmt die Abweichung des Luftvolumenstromes zwischen den Abteilen erwartungsgemäß zu. Das lässt sich durch den festgestellten Temperaturunterschied von 1,59 K zwischen dem Versuchs- und Referenzabteil herleiten. Denn mit sinkender Stallinnentemperatur nimmt die Lüftungsrate ab. Die Reduzierung der Abluftrate im Versuchsabteil hat neben den ökonomischen auch den Vorteil einer Minderung ökologischer Aspekte. Eine verminderte Freisetzung von Geruchsstoffen, Feinstaub sowie Ammoniak bei niedriger Abluftrate geht mit der Literatur einher (DÄMMGEN et al. 2013; HAHNE 2021).

#### 4.4.5 Vorversuche zur Feinstaubkonzentration

Die Außenluft ist saisonal abhängig mit Pilzen belastet zum Beispiel durch Blütenstaub oder Ackerbau (SCHARF 2004). Auffällig war in der Untersuchung, dass in dem Referenzabteil eine höhere Pilzbelastung bei 25 sowie bei 36 °C je m<sup>3</sup> gegenüber dem Versuchsabteil festzustellen ist (Tabelle 8).

Tabelle 8: Luftkeimuntersuchung auf „Gesamtpilze“ im Referenz- und Versuchsabteil sowie der Außenluft. Keine signifikanten Unterschiede. Methode: Spatelverfahren (Mittelwerte je Untersuchungstag).

Datum	Pilze 25 °C je m <sup>3</sup>			Pilze 36 °C je m <sup>3</sup>		
	Referenz-abteil	Versuchs-abteil	Außenluft	Referenz-abteil	Versuchs-abteil	Außenluft
17.05.2018	80.559	21.157	1.406	431	0,00	150
12.06.2018	14.046	1.769	1.081	61	19	71
20.06.2018	8.126	9.083	5.390	42	20	0
17.07.2018	15.594	5.469	4.760	53	40	0
25.07.2018	8.526	8.160	12.386	0	0	0
21.08.2018	13.480	20.201	15.220	119	69	249

In vergleichbaren Untersuchungen von GÄRTNER et al. (1975) sind die vorliegenden Unterschiede aus dem Referenz- und Versuchsabteil als minimal festzustellen. Übereinstimmung sind bei CORMIER et al. (1990) zu finden.

Aus der Tabelle 9 wird ersichtlich, dass ein Anstieg der Coliformen Bakterien je m<sup>3</sup> Wasser im Modultank die Luft mit Coliformen Bakterien im Versuchsabteil ebenfalls anreichert. Nach der Reinigung des Modultankes am 17.07. konnten keine Coliformen Bakterien mehr nachgewiesen werden.

Tabelle 9: Luftkeim- und Wasseruntersuchung auf Coliforme Bakterien im Referenz- und Versuchsabteil sowie der Außenluft und im Modultank. Keine signifikanten Unterschiede. Methode: Filtrationsverfahren (Mittelwerte je Untersuchungstag).

Datum	Coliforme Bakterien je m <sup>3</sup>			
	Referenzabteil	Versuchsabteil	Außenluft	Modultank
17.05.2018	0,00	7,44	0,00	0,00
12.06.2018	0,00	2,17	0,00	3,50
20.06.2018	0,00	122,44	4,27	106,00
17.07.2018	0,00	6,25	4,23	0,00
25.07.2018	0,00	3,06	36,99	0,60
21.08.2018	7,20	3,45	9,31	60,00

SEEDORF (2002) weist darauf hin, dass Einstreu, Aktivitätsgrad der Tiere oder auch die Fütterungstechnik in nicht unerheblichem Maße an der Höhe der Feinstaubkonzentration beteiligt sein könnten. Auch die äußerlichen Umweltwirkungen haben einen erheblichen Einfluss auf den Gehalt an Bakterien in der Luft (ANGERSBACH-HEGER 2002). MARTENS et al. (2001) stellen in ihren Untersuchungen fest, dass eine Reduzierung von luftgetragenen Pilzsporen stattfinden, wenn Filteranlagen vor der Zuluft installiert werden. Erste Voruntersuchungen zeigen in dieser Studie, dass ein Hygienekonzept für den Modultank mit Wasser essentiell ist. Eine Säuberung der Anlage konnte die Bildung eines Biofilmes verhindern und die Coliforme Bakterien reduzieren.

#### 4.4.6 Vorversuche zur Ammoniakkonzentration

Die Ammoniakkonzentration lag im Versuchsabteil im Tagesdurchschnitt bei  $5,3 \text{ g Tag}^{-1}$  sowie bei  $10,1 \text{ g Tag}^{-1}$  im Referenzabteil. Wobei 56 % der Messwerte im Referenz- bzw. 43 % im Versuchsabteil über dem ermittelten Tagesdurchschnittswert lagen. Die Spannweite der Ammoniakkonzentration war im Versuchsabteil 15,4 bis 1,18 und beim Referenzabteil 18,5 bis  $2,8 \text{ g Tag}^{-1}$ . Festgestellt wurde auch, dass in den Sommermonaten Juni und Juli die Differenzen der Ammoniakkonzentration zwischen den Abteilen am größten war (Abbildung 35).

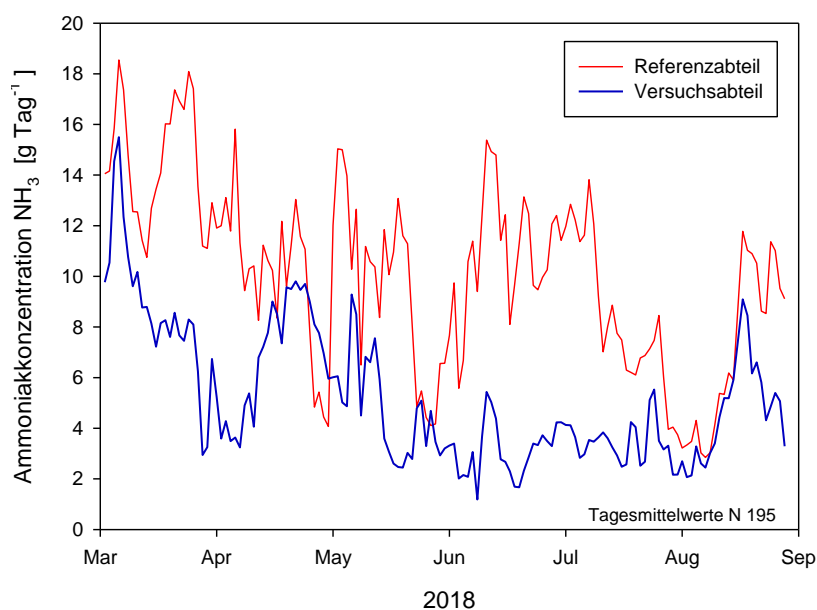


Abbildung 35: Tagesmittelwerte der Ammoniakkonzentration (NH<sub>3</sub>) im Untersuchungszeitraum März bis September 2018. Rot: Referenzabteil, blau: Versuchsabteil.

Die NH<sub>3</sub>- Freisetzung in Tierställen ist von vielen Einflussfaktoren abhängig. Neben den physikalischen und chemischen Parametern ist auch das Haltungsverfahren ausschlaggebend (KECK et al. 1995; GALLMANN 2003; GRONOW-SCHUBERT 2017). Erste Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Tagesmittelwerte im Referenzabteil gegenüber dem Versuchsabteil teilweise doppelt so hoch lagen. Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Ammoniakkonzentration im Referenzabteil über dem Versuchsabteil liegt. Die Vermutung liegt nah, dass eine Reduzierung der Stallufttemperatur und des Luftvolumenstromes die Ammoniakkonzentration minimieren. Das bestätigen auch die Untersuchungen von EPINATJEFF et al. (1997), PERTAGNOL (2013), (BÜSCHER et al. 1996), (PHILIPPE et al. 2007) und GRONOW-SCHUBERT (2017). Die Untersuchungen von STURM et al. (2021) zeigen, dass hohe

Schadgaskonzentrationen einen negativen Einfluss auf das Wachstum der Schweine haben. Es wird aber auch angemerkt, dass die Stallluftqualität von mehreren Faktoren abhängig ist. Die Ergebnisse bestätigen auch die Aussagen von WAGNER et al. (2015) dass eine Wechselwirkungen zwischen geringen Luftvolumenstrom und einer Reduzierung von  $\text{NH}_3$  und Feinstaub besteht. Chemisch betrachtet ist Ammoniak sehr gut wasserlöslich. Eine erhöhte relative Luftfeuchtigkeit der Stallluft z. B. durch adiabatische Zuluftkonditionierung im Versuchsabteil könnte die Ammoniakkonzentration reduziert haben.

Es ist hervorzuheben, dass die Ergebnisse aus den Tabelle 8 und Tabelle 9 sowie aus der Abbildung 35 dieser Studie keine verallgemeinernden Schlussfolgerungen zulassen. Die Untersuchung stellte zunächst eine Versuchseinheit innerhalb der Studie dar. Aus diesem Grund sind die gemessenen Konzentrationen relativiert und sollten in weiteren Untersuchungen Anwendung finden.



## **5 Bewertung der eigenen Vorgehensweise und des Versuchsdesigns**

### **5.1 Technikumsversuch**

Die Untersuchungen zur Verdunstungskühlung entsprechen im allgemeinen den Ergebnissen der Literatur. Die Effektivität des Systems ist durch die Außenklimabedingungen von relativer Luftfeuchtigkeit und Außentemperatur begrenzt. Ziegellochsteine bieten eine relativ kostengünstige Alternative zu herkömmlichen Materialien wie Kunststoffpads. Es wurde festgestellt, dass Temperaturdifferenzen von bis zu 6,5 K zur Außentemperatur möglich waren. Des Weiteren wurde bei Ziegellochsteinen mit 3 Steinreihen und einem Luftvolumenstrom von  $5000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  ein Befeuchtungsgrad von 74,30 %, eine durchschnittliche Druckdifferenz von 4,63 Pa und ein theoretischer durchschnittlicher Energiebedarf von 11,84 kW ermittelt. Dabei hat die Luftgeschwindigkeit einen essentiellen Einfluss auf die Effizienz des Kühlsystems während der gesamten Untersuchung. Grundsätzlich ist eine effektive Reduzierung der Außentemperatur mit Ziegellochsteinen und großen Oberflächen in Kombination mit geringen Luftvolumenströmen von  $5000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  und 3 Steinreihen als weiterer Ansatzpunkt zu empfehlen. Die Ergebnisse können als Grundlage für Kühlsysteme an Nutztierställen Eingang finden.

### **5.2 Praxisversuch**

Mit Ziegellochsteinen als Austauschmaterial konnte die Außenluft erfolgreich gekühlt werden, sie sind gut für ein adiabatisches Kühlsystem einsetzbar. Die Außentemperatur (2017  $T_{\text{out}} > 21^\circ\text{C}$ ; 2018  $T_{\text{ou}} > 20^\circ\text{C}$ ) wurde hierbei als Kriterium für die Aktivierung des Kühlsystems herangezogen. Maximal konnte eine Temperaturdifferenz von 15 K im Modul erreicht werden. Die relative Luftfeuchtigkeit erhöhte sich nach Passieren der Steinwand während aktiver und inaktiver adiabatischer Befeuchtung. Der Befeuchtungswirkungsgrad ist überdurchschnittlich hoch im Vergleich zu vorhandenen Kühlsystemen. Hierbei sind die größten Effekte bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von  $< 50 \%$  festzustellen. Eine Steigung der Effektivität bei gleichzeitiger Abnahme der Luftgeschwindigkeit und Zunahme von Wasser zur Temperaturdifferenz konnte in der vorliegenden Untersuchung nicht festgestellt werden. Es kann jedoch festgehalten werden, dass sich bei Luftgeschwindigkeiten über  $4 \text{ m s}^{-1}$  die theoretische benötigte Kühlleistung annähernd verdoppelt.

Die festgestellten positiven Effekte der Zuluftkonditionierung zeigen, dass im Versuchsabteil eine signifikant niedriger Temperaturdifferenz zum Referenzabteil während adiabatischer Befeuchtung festzustellen ist. In Folge dessen steigt die relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsabteil an. Die gleichzeitige Reduzierung von Hitzewellen und Temperaturamplituden wurden im Versuchsabteil bestätigt. Im Vergleich zur vorhandenen Literatur hat sich gezeigt, dass das Modul insgesamt eine hohe Effektivität besitzt. Die Zuluft konnte konditioniert und Temperaturspitzen abgemildert werden. Das System ist in seiner Wirkungsweise jedoch abhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur der Außenluft. Es hat sich in dieser Untersuchung gezeigt, dass noch weiterer Optimierungs- und Forschungsbedarf bei der Kombination von Erdwärmetauschern und adiabatischen Kühlsystemen mit Ziegellochsteinen besteht. Der Standort und die Bauweise des Moduls in einem Überseecontainer sind zu berücksichtigen und zu modifizieren. Durch die Verwendung von Zuluftkühlung an Schweineställen soll das Tierwohl und die Leistungsdaten der Sauen verbessert, sowie die Leistungseinbußen auf ein Minimum reduziert werden. Um solche Herausforderungen im Sauenstall zu vermeiden und den Sauen ein optimales Stallklima zu bieten, wurde ein nachrüstbares Modul zur Zuluftkonditionierung entwickelt.

Die ersten Ergebnisse dieser Studie zeigen, eine Verbesserung des THI sowie tendenziell höhere Absetzgewichte der Ferkel im Versuchsabteil. Eine signifikante Reduzierung des Luftvolumenstroms im Versuchsabteil hat vermutlich dazu geführt, dass die  $\text{NH}_3$ -Konzentration im Abteil sinkt. Im Referenzabteil waren die Ammoniakkonzentration am selben Tag teilweise doppelt so hoch.

Die Auswertung des Sauenplaners dient zur Vollständigkeit dieser Studie. Die Vermutung liegt nah, dass Merkmale wie z.B. Ferkelverluste, Wurfausgleich oder Absetzgewicht der Ferkel stärker ausgeprägt wären bei Annahme von Ceteris-Paribus. Da es sich bei der Untersuchung um einen Praxisbetrieb handelt, bleiben die Einflüsse des Betriebsleiters nicht immer nachvollziehbar. Somit sind weitere Studien erforderlich um die Merkmale aus dem Sauenplaner zu quantifizieren und zu verstehen. Die Luftkeimuntersuchung runden die Studie umfangreich ab. Es wurden tendenziell geringer Pilzbelastungen in der Zuluft im Versuchsabteil festgestellt. Das Wasser im Modultank sollte deshalb regelmäßig ausgetauscht werden.

### **5.3 Schlussfolgerungen für die praktische Anwendung**

Die Erfolgsaussichten des Moduls können als hoch eingestuft werden. Eine Kombination von Zuluftkonditionierung und Kühlung mit Ziegellochsteinen aus einem Modul das im Erdreich versenkt wird stellt eine Innovation dar.

Die Dimensionierung des Moduls aus der vorliegenden Studie kann dabei als Maßstab für weitere Entwicklungen Anwendung finden. Dabei ist der Lufteinlass am Modul zu überprüfen. Die Öffnungsschlitze (Gitter) waren für Laub, Gräser und ähnliche Stoffe durchlässig. Vorstellbar wäre ein luftdurchlässiges Flies oder ein engmaschiges Netz. Des Weiteren ist die Bauweise des Modultanks zu optimieren. Die Anreicherung von Algen im Wasser und die Bildung eines Biofilms an Ziegellochsteinen sollte verhindert werden. Es besteht die Möglichkeit das Wasser im Modul durch Silber – oder Kupferionen anzureichern. Diese beiden Stoffe haben eine toxische Wirkung auf Mikroorganismen. Auch eine mögliche Anwendung von UV-Strahlung ist denkbar. UV-Strahlung ist grundsätzlich in der Lage Bakterien und Viren abzutöten. Hauptsächliche Einsatzgebiete von UV-Strahlung wäre die Oberflächenentkeimung, die Raumluftdesinfektion oder die Wasseraufbereitung.

Darüber hinaus könnte die Datenaufnahme erweitert werden. Interessant wären für den technischen Teil: die Feuchtigkeit und Temperatur am Ziegellochstein, die Wassertemperatur im Modultank und der Testlauf mit verschiedenen Düsen zur Befeuchtung.

Bei der Auswertung von tierspezifischen Aspekten wäre es denkbar bei den Sauen die Lebendmasse, Rückenspeckdicke, Fruchtbarkeit sowie Futter- und Wasseraufnahme, Rektaltemperatur, Atem- und Herzfrequenz zu erfassen. Bei den Ferkeln könnten tierbezogene Ohrmarken konkrete Aussagen zu Gewichtsverläufen und späterer Schlachtkörperauswertung liefern. Auch die ökonomischen Aspekte im Tier- und Technikbereich könnten umfassender kalkuliert werden.

## 6 Zusammenfassung

### Technik:

Ein optimales Stallklima ist bei der Haltung von Nutztieren Grundvoraussetzung für die Gewährleistung des Tierwohls und damit auch des wirtschaftlichen Erfolges. Die Temperaturen sowie die relativen Feuchten der Stallluft sollten daher an die Bedürfnisse der Schweine optimiert sein. Hitzewellen, große Schwankungen der Stalllufttemperatur und relativen Stallluftfeuchten in der Stallluft beeinträchtigen die Tiere und führen zu einer reduzierten Leistung und Futteraufnahme die mit einer reduzierten Gesundheit einhergehen kann. Es ist damit zu rechnen, dass die Anforderungen an die Lüftungstechnik in Tierproduktionssystemen weiterhin steigen werden. Grundsätzlich haben sich adiabatische Kühlsysteme etabliert. Die Effektivität dieser Systeme ist begrenzt durch Außenklimabedingungen, insbesondere von der relativen Luftfeuchtigkeit und Außentemperatur. Am Markt vorhandene Materialien sind teuer in der Anschaffung und die Wirksamkeit sowie die Lebensdauer ist begrenzt.

Diese Studie hatte das Ziel, die Variation von Luftvolumenströmen und Ziegellochsteinen auf die Kühlleistung von Zuluft und konditionierter Abluft unter standardisierten Bedingungen zu analysieren. Zu klären war, wie das System auf die Einflüsse von adiabatischer Befeuchtung, Druckdifferenz, Temperatur sowie relative Luftfeuchtigkeit reagiert. Die Ergebnisse können dann als Grundlage für die Konstruktion eines nachrüstbaren Moduls an Schweineställen dienen.

Die Untersuchung fanden an der Universität Göttingen unter mitteleuropäischen Klimabedingungen statt. Für die Messperioden wurden zwei baugleiche Module konstruiert. Es wurde immer nur ein Parameter gegenüber dem Referenzmodul verändert, so dass eine direkte Vergleichbarkeit von Effekten gewährleistet war. Es konnte festgestellt werden, dass Ziegellochsteine eine Alternative zu herkömmlichen Materialien wie Kunststoffpads sind. Es waren Temperaturdifferenzen von bis zu 6,5 K zur Außentemperatur möglich.

### **Praxis:**

Die Anforderungen an die Lüftungstechnik in der Tierproduktion werden weiterhin steigen. Dabei reicht es nicht aus mit hoher Geschwindigkeit mehr Luftvolumenstrom in das Abteil zu fördern um Hitzewellen zu minimieren. Insbesondere bei Sauen im Abferkelstall müssen zwei Klimazonen reguliert werden. Zu einen der Bereich um die Sau herum bei Temperaturen von 16-22 °C, zum anderen der Bereich der Ferkel mit 30-32 °C. Ziel des vorliegenden Vorhabens ist die Entwicklung eines innovativen nachrüstbaren Moduls zur Zuluftkonditionierung für Schweineställe. Dabei soll die Zuluft möglichst energieeffizient gekühlt, die hohen Temperaturspitzen abgemildert und die täglichen Tag- / Nachtschwankungen gedämpft werden, um ein verbessertes Stallklima zu erzielen. Als Austauschoberfläche für die adiabatische Befeuchtung wurden Ziegellochsteine verwendet. Die Untersuchungen wurden an einem Abferkelstall im Landkreis Vechta (Deutschland) unter Praxisbedingungen über einen Zeitraum von 26 Monaten durchgeführt. Neben dem Versuchsabteil stand ein baugleiches Referenzabteil für die Untersuchung zur Verfügung.

Es wurde festgestellt, dass während adiabatischer Befeuchtung im Modul eine Temperaturminderung von durchschnittlich 4,47 K zur Außentemperatur bei einer Luftgeschwindigkeit von 7,12 m s<sup>-1</sup> sowie einem Massenstrom Wasser von 8,59 g s<sup>-1</sup> möglich war. Maximal wurde eine Temperaturdifferenz von -15 K ermittelt. Der durchschnittliche Befeuchtungsgrad lag bei 79,48 %. In Folge dessen wurde ein signifikanter Temperaturunterschied von durchschnittlich 1,59 K zwischen Versuchs- und Referenzabteil festgestellt. Die relative Luftfeuchtigkeit erhöhte sich im Versuchsabteil dabei auf 65,82 %. Es wurde eine gesamteinheitliche Reduzierung von Hitzewellen und Temperaturamplituden im Versuchsabteil gemessen. In der vorliegenden Studie wurde während der Säugezeit innerhalb von 6 Durchgängen ein tendenziell höheres Absetzgewicht der Ferkel, eine Reduzierung des THI sowie des Luftvolumenstromes und NH<sub>3</sub>-Konzentration im Versuchsabteil gegenüber dem Referenzabteil festgestellt.

## 7 Summary

When keeping livestock, an optimal stable climate is a basic prerequisite for ensuring animal welfare and thus also economic success. The temperatures and the relative humidity of the barn air should therefore be optimized to the needs of the pigs. Heat waves, large fluctuations in barn air temperature and relative barn air humidity in the barn air affect the animals and lead to reduced performance and feed intake, which can be associated with reduced health. It can be expected that the requirements for ventilation technology in animal production systems will continue to increase. Basically, adiabatic cooling systems have established themselves. The effectiveness of these systems is limited by outdoor climate conditions of relative humidity and outdoor temperature. Materials available on the market are expensive to purchase and their effectiveness and lifespan are limited.

The aim of this study was to analyze the variation of air volume flows and brick perforated bricks on the cooling performance of supply air and conditioned exhaust air under standardized conditions. It had to be clarified how the system reacts to the influences of adiabatic humidification, pressure difference, temperature and relative humidity. The results can then serve as a basis for the construction of a retrofittable module on pig houses.

The investigation took place at the University of Göttingen under Central European climatic conditions. Two identical modules were constructed for the measurement periods. Only one parameter was ever changed compared to the reference module, so that a direct comparison of effects was guaranteed. It was found that perforated bricks are an alternative to traditional materials such as plastic pads. Temperature differences of up to 6.5 K to the outside temperature were possible.

### **Practical trial**

The requirements for ventilation technology in animal production will continue to increase. It is not enough to pump more air volume flow into the compartment at high speed to minimize heat waves. In the case of sows in the farrowing pen in particular, two climate zones must be regulated. On the one hand the area around the sow with temperatures of 16-22 °C, on the other hand the area around the piglets with 30-32 °C. The aim of the present project is the development of an innovative, retrofittable con-air module for supply air conditioning for pigsties. The supply air should be cooled as

energy-efficiently as possible, the high temperature peaks reduced and the daily day-night fluctuations dampened in order to achieve an improved stable climate. Perforated bricks were used as an exchange surface for adiabatic humidification. The investigations were carried out in a farrowing pen in the district of Vechta (Germany) under practical conditions over a period of 26 months. In addition to the test compartment, an identical reference compartment is available for the investigation. It was found that during adiabatic humidification in the con-air module, a temperature reduction of an average of 4.47 K compared to the outside temperature at an air speed of 7.12 m s<sup>-1</sup> and a water mass flow of 8.59 g s<sup>-1</sup> was possible. A maximum temperature difference of -15 K was determined. The average degree of humidification was 79.48%. As a result, a significant temperature difference of 1.59 K on average was found between the test and reference compartments. The relative humidity in the test compartment increased to 65.82%. A uniform reduction in heat waves and temperature amplitudes in the experimental compartment was observed. In the present study, a tendency towards higher weaning weight of the piglets, a reduction in the THI as well as the air volume flow and NH<sub>3</sub> concentration in the test compartment compared to the reference compartment was determined during the lactation period within 6 passages.

## 8 Literatur

- Abdel-Ghany, A.M.; Kozai, T. (2006): Cooling Efficiency of Fogging Systems for Greenhouses. *Biosystems Engineering* 94(1), S. 97–109, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.02.008>
- Abshoff, A.I. (1974): Künstliche Kühlung von Schweineställen, Hilstrup (Westf.), KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverl.
- AEL (Hg.) (2007): Heft 17: Berechnungs- und Berechnungs- und Planungsgrundlagen für das Klima in geschlossenen Ställen, Frankfurt
- Akbari, H.; Bretz, S.; Kurn, D.; Hanford, J. (1997): Peak power and cooling energy savings of high-albedo roof. *Energy and Buildings* 25(2), S. 117–126
- Albright, L.D. (1990): Environment control for animals and plants, Saint Joseph Mich., ASAE
- Al-Sulaiman, F. (2002): Evaluation of the performance of local fibers in evaporative cooling. *Energy Conversion and Management* 43(16), S. 2267–2273, [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00121-2](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00121-2)
- Andersson, M. (1998): Reducing ammonia emissions by cooling of manure in manure culverts. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* (51), S. 73–79
- Andresen, N.; Redbo, I. (1999): Foraging behaviour of growing pigs on grassland in relation to stocking rate and feed crude protein level. *Applied Animal Behaviour Science* 62(2-3), pp. 183–197, [https://doi.org/10.1016/s0168-1591\(98\)00221-4](https://doi.org/10.1016/s0168-1591(98)00221-4)
- Angersbach-Heger, S. (2002): Untersuchungen zur Emission und Verfrachtung luftgetragener Mikroorganismen von der Auslauffläche einer Legehennenfreilandhaltung. Dissertation, Tierärztlichen Hochschule Hannover
- Anonym (2003): Chapter 22: Environmental control for animals and plants; chapter 51: Evaporative cooling applications. In: Handbook Heating, ventilating, and air-conditioning applications. Ed. ASHRAE, Atlanta, Ga, ASHRAE
- Anonym (Hg.) (2007): Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE



CHANGE. Summary for Policymakers was formally approved at the 8th Session of Working Group II of the IPCC, Brussels, April 2007

Anonym (2012): CHAPTER 41: EVAPORATIVE AIR-COOLING EQUIPMENT. In: Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment. Hg. ASHRAE, 41.1-41.13

Anonym (2018): Wetterstationsdaten der Wetterstation Diepholz. CDC (Climate Data Center). [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html)

Arbel, A.; Yekutieli, O.; Barak, M. (1999): Performance of a Fog System for Cooling Greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research* 72(2), S. 129–136, <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0351>

Barbari, M.; Conti, L. (2009): Use of different cooling systems by pregnant sows in experimental pen. *Biosystems Engineering* 103(2), S. 239–244, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.016>

Bartussek, H. (1999): A review of the animal needs index (ANI) for the assessment of animals' well-being in the housing systems for Austrian proprietary products and legislation. *Livestock Production Science* 61(2-3), pp. 179–192, [https://doi.org/10.1016/s0301-6226\(99\)00067-6](https://doi.org/10.1016/s0301-6226(99)00067-6)

Bea, W. (2004): Vergleich zweier Mastschweinehaltungssysteme. Dissertation, Fakultät Agrarwissenschaften Universität Hohenheim. Inst. für Agrartechnik

Beck, E. (1996): *Adiabate Kühlung mit Plattenwärmetauschern*, 27. Aufl.

Beyersdorfer, G.; Germand, U. (2012): Kühlung von Schweineställen durch Unterflur-Zuluftführung. *LANDTECHNIK–Agricultural Engineering* 67(3), S. 221–224

Bianca, W. (1971): Anpassung des Haustieres an seine klimatische Umgebung. *Schweiz Landwirt Forsch*, S. 155–205

Black, J.L.; Mullan, B.P.; Lorsch, M.L.; Giles, L.R. (1993): Lactation in the sow during heat stress. *Livestock Production Science* 35(1-2), S. 153–170, [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(93\)90188-N](https://doi.org/10.1016/0301-6226(93)90188-N)

Bockisch, F.-J.; Jungbluth, T.; Rudovsky, A. (1999): Technische Indikatoren für die Beurteilung einer tiergerechten Haltung von Rindern, Schweinen und Legehennen. *Züchtungskunde* 71(1), S. 38–63

- Bogner, H. (1984): Der Standort der Nutztierethologie. In: Verhalten landwirtschaftlicher Nutztiere. 185 Abbildungen, 40 Tabellen. Hg. Bogner, H.; Andreae, U., Stuttgart, Ulmer, S. 17–22
- Bogner, H.; Andreae, U. (Hg.) (1984): Verhalten landwirtschaftlicher Nutztiere. 185 Abbildungen, 40 Tabellen, Stuttgart, Ulmer
- Bond, T.E.; Heitman, H.; Kelly, C.F. (1963): Effect of Diurnal Temperature on Heat Loss and Well Being of Swine. Transactions of the ASAE 6(2), S. 132–135, <https://doi.org/10.13031/2013.40846>
- Bottcher, R.W.; Baughman, G.R.; Gates, R.S.; Timmons, M.B. (1991): Characterizing efficiency of misting systems for poultry. Transactions of the ASAE 34(2), S. 586–590, <https://doi.org/10.13031/2013.31703>
- Botto, L.; Lendelova, J.; Strmenova, A.; Rechstädterova, T. (2014): The effect of evaporative cooling on climatic parameters in a stable for sows. Research in Agricultural Engineering Special Issue(60), S. 85–91
- Brameshuber, W.; Koster, M.; Graubohm, M.; Saenger, D. (2011): Entwicklungsfähigkeit von Mauerwerk aus baustofflicher Sicht. Mauerwerk 15(5), S. 273–280, <https://doi.org/10.1002/dama.201100514>
- Brink, C.; van Ierland, E.; Hordijk, L.; Kroeze, C. (2005): Cost\_effective emission abatement in agriculture in the presence of interrelations. Cases for the Netherlands and Europe. Ecological Economics 53(1), S. 59–74, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.05.008>
- Brown-Brandl, T.M.; Eigenberg, R.A.; Nienaber, J.A.; Kachman, S.D. (2001): Thermoregulatory profile of a newer genetic line of pigs. Livestock Production Science 71(2-3), S. 253–260, [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(01\)00184-1](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(01)00184-1)
- Brown-Brandl, T.M.; Nienaber, J.A.; Turner, L.W. (1998): Acute heat stress effects on heat production and respiration rate in swine. Transactions of the ASAE 41(3), S. 789–793, <https://doi.org/10.13031/2013.17216>
- Brown-Brandl, T.M.; Nienaber, J.A.; Xin, H.; Gates, R.S. (2004): A Literature Review of Swine Heat Production. Transactions of the ASAE 47(1), S. 259–270, <https://doi.org/10.13031/2013.15867>

- Bucklin, R.A.; Bray, D.R.; Martin, J.G.; Carlos, L.; Carvalho, V. (2009): Environmental Temperatures in Florida Dairy Housing. *Applied Engineering in Agriculture* 25(5), S. 727–735, <https://doi.org/10.13031/2013.28851>
- Bull, R.P.; Harrison, P.C.; Riskowski, G.L.; Gonyou, H.W. (1997): Preference Among Cooling Systems by Gilts Under Heat Stress. *Journal of animal science* 75(8), S. 2078–2083, <https://doi.org/10.2527/1997.7582078x>
- Busch, B.; Schlenker, G. (2010): Die Vermeidung von Hitzeschäden bei landwirtschaftlichen Nutztieren (Geflügel, Schweine, Rinder). *Tierärztliche Vereinigung für Tierschutz e.V., Merkblatt Nr. 100, Bramsche*
- Büscher, W.; Franke, G.; Haidn, B.; Müller, H.-J.; Niethammer, F.; Leuschner, P. (2002): Lüftung von Schweineställen. 3. überarbeitete Fassung. DLG Arbeitsunterlage
- Büscher, W.; Hartung, E.; Lais, S. (1996): Ammoniakemissionen aus Schweineställen senken. Planungsempfehlungen für Haltungssysteme. *LANDTECHNIK* 51(3), 160-161
- Büscher, W.; Nannen, C.; Ratschow, J.-P.; Schulte-Sutrum, R. (2008): DLG-Merkblatt 346 - Kühlung von Schweineställen, Frankfurt am Main, 2. Aufl.
- Cabaraux, J.-F.; Philippe, F.-X.; Laitat, M.; Canart, B.; Vandenheede, M.; Nicks, B. (2009): Gaseous emissions from weaned pigs raised on different floor systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 130(3-4), S. 86–92, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.11.016>
- Caldara, F.R.; Dos Santos, L.S.; Machado, S.T.; Moi, M.; Alencar Nääs, I. de; Foppa, L.; Garcia, R.G.; Kássia Silva Dos Santos, R. de (2014): Piglets' surface temperature change at different weights at birth. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 27(3), pp. 431–438, <https://doi.org/10.5713/ajas.2013.13505>
- Camargo, J.R.; Ebinuma, C.D.; Silveira, J.L. (2005): Experimental performance of a direct evaporative cooler operating during summer in a Brazilian city. *International Journal of Refrigeration* 28(7), S. 1124–1132, <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.12.011>

- Chen, Q.; Pan, N.; Guo, Z.-Y. (2011): A new approach to analysis and optimization of evaporative cooling system II. Applications. *Energy* 36(5), S. 2890–2898, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.031>
- Chen, Q.; Yang, K.; Wang, M.; Pan, N.; Guo, Z.-Y. (2010): A new approach to analysis and optimization of evaporative cooling system I. Theory. *Energy* 35(6), S. 2448–2454, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.037>
- Christen, O. (2008): Langfristige Trends und Anpassung der Anbausysteme an den Klimawandel, Julius Kühn-Institut; Deutsche Pflanzenschutz-Tagung, DPG Selbstverl., S. 57–64
- Cielejewski, H. (2010): Teilprojekt "Kühlung eines Sauenstalles". Abschlussbericht für das KTBL-Projekt zum BMELV - Modellvorhaben landwirtschaftliches Bauen "Kühlung von Schweineställen"
- Clauss, W.; Clauss, C. (2007): Tierphysiologie kompakt, München, Elsevier Spektrum Akad. Verl., 1. Aufl.
- Close, W.H. (1989): The influence of the thermal environment on the voluntary food. BSAP Occasional Publication. The Voluntary Food Intake of Pigs 13, S. 87–96
- Collin, A.; van Milgen, J.; Dubois, S.; Noblet, J. (2001): Effect of high temperature on feeding behaviour and heat production in group-housed young pigs. *British Journal of Nutrition* 86(01), S. 63, <https://doi.org/10.1079/BJN2001356>
- Cormier, Y.; Tremblay, G.; Meriaux, A.; Brochu, G.; Lavoie, J. (1990): Airborne microbial contents in two types of swine confinement buildings in Quebec. *American Industrial Hygiene Association journal* 51(6), pp. 304–309, <https://doi.org/10.1080/15298669091369709>
- Czarick, M.; Fairchild, B.D. (2008): Evaporative cooling. In: Poultry production in hot climates. Ed. Daghir, N.J., Cambridge, Mass, CABI North American Office, 2nd. ed., pp. 121–128
- Dağtekin, M.; Karaca, C.; Yildiz, Y. (2009a): Long axis heat distribution in a tunnel-ventilated broiler house equipped with an evaporative pad cooling system. *Animal Production Science* 49(12), S. 1125, <https://doi.org/10.1071/EA08077>

- Dağtekin, M.; Karaca, C.; Yıldız, Y.i.; Başçetinçelik, A.; Paydak, Ö. (2011): The effects of air velocity on the performance of pad evaporative cooling systems. *African Journal of Agricultural Research* 6(7), S. 1813–1822, <https://doi.org/10.5897/AJAR10.1110>
- Dağtekin, M.; Karaca, C.; Yıldız, Y. (2009b): Performance characteristics of a pad evaporative cooling system in a broiler house in a Mediterranean climate. *Biosystems Engineering* 103(1), S. 100–104, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.011>
- Dai, Y.J.; Sumathy, K. (2002): Theoretical study on a cross-flow direct evaporative cooler using honeycomb paper as packing material. *Applied Thermal Engineering* 22(13), S. 1417–1430, [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00069-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00069-8)
- Dämmgen, U.; Haenel, H.-D.; Rösemann, C.; Hahne, J.; Eurich-Menden, B.; Grimm, E.; Döhler, H. (2013): Landwirtschaftliche Emissionen. Teilbericht zum F&E-Vorhaben "Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung - PAREST", Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Dauncey, M.J.; Ingram, D.L. (1983): Evaluation of the effects of environmental temperature and nutrition on body composition. *The Journal of Agricultural Science* 101(2), pp. 351–358, <https://doi.org/10.1017/s0021859600037667>
- Deglin, D.; van Caenegem, L.; Dehon, P. (1999): Subsoil Heat Exchangers for the Air Conditioning of Livestock Buildings. *Journal of Agricultural Engineering Research* 73(2), S. 179–188, <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0401>
- Demo, M.; Jentsch, W.; Hoffmann, L. (1995): Effect of long time exposure to different environmental temperatures on heat production of growing pigs. *Livestock Production Science* 43(2), S. 149–152, [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(95\)00035-J](https://doi.org/10.1016/0301-6226(95)00035-J)
- Deutscher Wetterdienst (2016): Klimawandel - Aktuelle Nachrichten, Offenbach
- Dolz, N.; Babot, D.; Álvarez-Rodríguez, J.; Forcada, F. (2015): Improving the environment for weaned piglets using polypropylene fabrics above the animals in cold periods. *International journal of biometeorology* 59(12), pp. 1839–1847, <https://doi.org/10.1007/s00484-015-0991-0>

- Eichmann, R.A. (1997): Klimatechnik. Arbeits- und Übungsbuch mit grundlegenden Aufgaben und Lösungen, Heidelberg, Müller, 4. Aufl.
- Eigenberg, R.A.; Brown-Brandl, T.M.; Nienaber, J.A.; Hahn, G.L. (2005): Dynamic Response Indicators of Heat Stress in Shaded and Non-shaded Feedlot Cattle, Part 2. Predictive Relationships. *Biosystems Engineering* 91(1), S. 111–118, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.02.001>
- Eitzinger, J. (2009): Landwirtschaft und Klimawandel. [https://wald-wasser-weinviertel.boku.ac.at/pdf/presentation\\_eitzinger.pdf](https://wald-wasser-weinviertel.boku.ac.at/pdf/presentation_eitzinger.pdf), Wien
- Ekkel, E.D.; van Doorn, C.E.A.; Hessing, M.J.C.; Tielen, M.J.M. (1995): The Specific-Stress-Free housing system has positive effects on productivity, health, and welfare of pigs. *Journal of Animal Science* 73(6), S. 1544–1551, <https://doi.org/10.2527/1995.7361544x>
- Eory, V.; Topp, C.F.E.; Moran, D. (2013): Multiple-pollutant cost-effectiveness of greenhouse gas mitigation measures in the UK agriculture. *Environmental Science & Policy* 27, S. 55–67, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.11.003>
- Epinatjeff, P.; Becker, J.; Jungbluth, T.; Scheuble, A. (1997): Kühlere Stallluft-geringere Ammoniakemissionen. Ein BML-Modellvorhaben zur Minderung von Ammoniak- emissionen durch Lüftung mit Erdreichwärmelauscher. *LANDTECHNIK–Agricultural Engineering* 52(6), S. 320–321
- Fangman, T.J.; Tubbs, R.C.; Henningsen-Dyer, K. (1996): Influence of weaning site, weaning age, and viral exposure on production performance in early-weaned nursery pigs. *Swine Health Prod* 4, S. 223–229
- Ferm, M. (1998): Atmospheric ammonia and ammonium transport in Europe and critical loads: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51(1), S. 5–17, <https://doi.org/10.1023/A:1009780030477>
- Feuerriegel, U. (2016): Verfahrenstechnik mit EXCEL. [https://books.google.de/books?id=fh28DAAAQBAJ&pg=PA259&lpg=PA259&dq=p\\_S\\_Wagner\\_H2O\\_D&source=bl&ots=juHLUtwbTg&sig=wcfEJ2GgK\\_PFIPO0AwpSPGMupRs&hl=de&sa=X&ved=0ahUKEwjwvfKhuIXcAhXRKVAKHZBOCsgQ6AEIJzAA#v=onepage&q=p\\_S\\_Wagner\\_H2O\\_D&f=false](https://books.google.de/books?id=fh28DAAAQBAJ&pg=PA259&lpg=PA259&dq=p_S_Wagner_H2O_D&source=bl&ots=juHLUtwbTg&sig=wcfEJ2GgK_PFIPO0AwpSPGMupRs&hl=de&sa=X&ved=0ahUKEwjwvfKhuIXcAhXRKVAKHZBOCsgQ6AEIJzAA#v=onepage&q=p_S_Wagner_H2O_D&f=false), Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden

- Franco-Salas, A.-S.; Valera, D.L.L.; Madueno, A.; Peña, A. (2010): Influence of water and air flow on the performance of cellulose evaporative cooling pads used in Mediterranean greenhouses. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 53(2), S. 565–576, <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4506.3522>
- Gallmann, E. (2003): Vergleich von zwei Haltungssystemen für Mastschweine mit unterschiedlichen Lüftungsprinzipien - Stallklima und Emissionen. Dissertation, Stuttgart, Inst. für Agrartechnik. Univ. Hohenheim
- Gärttner, E.; Müller, W.; Farmanara, F. (1975): Die Zählung von Luftkeimkolonien mit einem elektronischen Zählgerät (Colony Counter). *Zentralblatt für Veterinärmedizin Reihe B* 22(4), pp. 326–334, <https://doi.org/10.1111/j.1439-0450.1975.tb00594.x>
- Gates, R.S.; Usry, J.L.; Nienaber, J.A.; Turner, L.W.; Bridges, T.C. (1991): An optimal misting method for cooling livestock housing. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 34(5), S. 2199–2206, <https://doi.org/10.13031/2013.31859>
- Goldman, W.L.R.a.R.F. (1969): Response of Swine to Acute Heat Exposure. *Transactions of the ASAE* 12(2), S. 164–169, <https://doi.org/10.13031/2013.38789>
- Gramatte, W. (2009): Die Umsetzung der aktuellen DIN 18910 in die Praxis, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein; Bautagung Raumberg-Gumpenstein, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft, S. 95–100
- Gregory, N.G.; Temple Grandin (Hg.) (1998): *Animal Welfare and Meat Science*, Colorado, CAB International
- Gronow-Schubert, S. (2017): Untersuchungen zum Emissionsgeschehen von Ammoniak und Methan in der Mastschweinehaltung. Dissertation, Universität Hohenheim
- Grote, D.; Güttler, J.; Jäger, K.-H.; Köneke, K.; Kuhfahl, Babette, Maiworm, Karin; Noack, U.; Wegert, J.; Wimmers, C. (2006): Stallklimaprüfung in der landwirtschaftlichen Tierhaltung. Empfehlungen der Länderarbeitsgruppe Stallklima

- Gunnarson, H.J.; Butchbaker, A.F.; Witz, R.L.; Dinusson, W.E. (1967): Effect of Air Velocity, Air Temperature, and Mean Radiant Temperature on Performance of Growing-Finishing Swine. *Transactions of the ASAE* 10(6), S. 715–717, <https://doi.org/10.13031/2013.39768>
- Haas, U. (2002): *Physik für Pharmazeuten und Mediziner. Ein Lehrbuch für alle Studierenden mit Physik als Nebenfach ; mit 84 Tabellen*, Stuttgart, Wiss. Verl.-Ges, 6. Aufl.
- Haenel, H.-D.; Rösemann, C.; Dämmgen, U.; Poddey, E.; Freibauer, A.; Döhler, H.; Eurich-Menden, B.; Wulf, S.; Dieterle, M.; Osterburg, B. (2012): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 - 2010 Report on methods and data (RMD) Submission 2012. Special Issue 356
- Haeussermann, A.; Hartung, E.; Jungbluth, T.; Vranken, E.; Aerts, J.-M.; Berckmans, D. (2007a): Cooling effects and evaporation characteristics of fogging systems in an experimental piggery. *Biosystems Engineering* 97(3), S. 395–405, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.019>
- Haeussermann, A.; Vranken, E.; Aerts, J.-M.; Hartung, E.; Jungbluth, T.; Berckmans, D. (2007b): Evaluation of Control Strategies for Fogging Systems in Pig Facilities. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50(1), S. 265–274, <https://doi.org/10.13031/2013.22407>
- Hahn, G.L.; Mader, T.L.; Eigenberg, R.A. (2003): Perspective on development of thermal indices for animal studies and management. In: *Interactions between climate and animal production*. Ed. Lacetera, N., Wageningen, Wageningen Acad. Publ, pp. 31–44
- Hahn, G.L.; Nienaber, J.A.; DeShazer, J.A. (1987): Air Temperature Influences on Swine Performance and Behavior. *Applied Engineering in Agriculture* 3(2), S. 295–302, <https://doi.org/10.13031/2013.26693>
- Hahne, J. (2021): Verschärfung der Anforderungen an die Reduzierung von Ammoniakemissionen aus der Tierhaltung. Bioverfahrens- und Umwelttechnik Möglichkeiten zur Emissionsvermeidung und -verminderung. In: *Jahrbuch der Agrartechnik 2020*. Hg. Frerichs, L., Braunschweig, S. 1–14



- Heidenreich, T. (2015): Optimierung des Stallklimas durch Wärmetauscher und Kühlsysteme. Fachtag "Optimierung des Stallklimas und genehmigungsrechtliche Anforderungen beim Bau von Schweineställen", Eichhof 03.11.2015.  
[http://www.alb-hessen.de/downloads/Heidenreich\\_03112015.pdf](http://www.alb-hessen.de/downloads/Heidenreich_03112015.pdf), Zugriff am 15.3.2017
- Heiland, S.; Regener, M.; Stutzriemer, S. (2005): Auswirkungen des demographischen Wandels auf Umwelt- und Naturschutz. *Raumforschung und Raumordnung* 63(3), S. 189–198, <https://doi.org/10.1007/BF03182951>
- Heitman, H.; Hughes, E.H. (1949): The Effects of Air Temperature and Relative Humidity on the Physiological well being of Swine. *Journal of Animal Science* 8(2), S. 171–181, <https://doi.org/10.2527/jas1949.82171x>
- Heitman, H.; Kelly, C.F.; Bond, T.E. (1958): Ambient Air Temperature and Weight Gain in Swine. *Journal of Animal Science* 17(1), S. 62–67, <https://doi.org/10.2527/jas1958.17162x>
- Hempel, S.; König, M.; Menz, C.; Janke, D.; Amon, B.; Banhazi, T.M.; Estellés, F.; Amon, T. (2018): Uncertainty in the measurement of indoor temperature and humidity in naturally ventilated dairy buildings as influenced by measurement technique and data variability. *Biosystems Engineering* 166, S. 58–75, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.11.004>
- Hennegriff, W.; Kolokotronis, V.; Weber, H.; Bartels, H. (2006): Klimawandel und Hochwasser. *Erkenntnisse und Anpassungsstrategien beim Hochwasserschutz. Abwasser Abfall* 53(8), S. 770–779
- Hessel, E.F.; van den Weghe, H. (2011): Erdwärmetauscher zur ganzjährigen Zuluftkonditionierung im Abferkelstall. *LANDTECHNIK–Agricultural Engineering* 66(3), S. 183–186
- Holmes, C.; Close, W.H. (1985): influence of climatic variables on energy metabolism and associated aspects of productivity in the pig. *Recent developments in pig nutrition / editors, D.J.A. Cole, W. Haresign*
- Hörner, B.; Reeker, J. (Hg.) (2011): *Handbuch der Klimatechnik*, Berlin/Offenbach, VDE-Verlag, 2008. Aufl.

- Hörning, B. (1999): Artgemäße Schweinehaltung. Grundlagen und Beispiele aus der Praxis, Bad Dürkheim/Norderstedt, SÖL; Libri Books on Demand, 4. Aufl.
- Hoy, S.; Gauly, M.; Krieter, J. (2006): Nutztierhaltung und -hygiene. 114 Tabellen, Stuttgart, Ulmer
- Huhnke, R.L.; McCowan, L.C.; Meraz, G.M.; Harp, S.L.; Payton, M.E. (2001): Determining the Frequency and Duration of Elevated Temperature-Humidity Index. American Society of Agricultural and Biological Engineers (01-4111), <https://doi.org/10.13031/2013.7464>
- Huhnke, R.L.; McCowan, L.C.; Meraz, G.M.; Harp, S.L.; Payton, M.E. (2004): Using evaporative cooling to reduce the frequency and duration of elevated temperature-humidity indices in oklahoma. Applied Engineering in Agriculture 20(1), S. 95–99, <https://doi.org/10.13031/2013.15687>
- Huijben, J.J.H.; Hoofs, A.I.J. (1997): Vergelijking van grondbuizen en grondwater-unit bij vleesvarkens, Sterksel
- Huynh, T.T.T.; Aarnink, A.J.A.; Verstegen, M.W.A.; Gerrits, W.J.J.; Heetkamp, M.J.W.; Kemp, B.; Canh, T.T. (2005): Effects of increasing temperatures on physiological changes in pigs at different relative humidities. Journal of animal science 83(6), S. 1385, <https://doi.org/10.2527/2005.8361385x>
- Ingram, D.L.; Legge, K.F. (1969): The effect of environmental temperature on respiratory ventilation in the pig. Respiration Physiology 8(1), S. 1–12, [https://doi.org/10.1016/0034-5687\(69\)90041-3](https://doi.org/10.1016/0034-5687(69)90041-3)
- Irgang, P. (2001): Anpassungsmöglichkeiten von Schweinen an stallklimatische Gegebenheiten. In: Gumpensteiner Bautagung 2001: „Stallbau – Stallklima – Verfahrenstechnik“. Hg. Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, S. 87–92
- Jarnych, V.S.; Schmidt, G.; Kurzweg, W.; Japel, W.; Laudien, K. (Hg.) (1976): Aerosole. Theorie u. Praxis d. Aerosolanwendung in Veterinärmedizin u. Tierproduktion, Berlin, Dt. Landwirtschaftsverl., 1. Aufl.
- Jasmund, N. von; Schmithausen, A.J.; Krommweh, M.S.; Trimborn, M.; Boeker, P.; Büscher, W. (2022): Assessment of ammonia sensors and photoacoustic

- measurement systems using a gas calibration unit. *Computers and Electronics in Agriculture* 194(6), S. 106744, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106744>
- Jeong, J.-W.; Mumma, S.A. (2004): Simplified cooling capacity estimation model for top insulated metal ceiling radiant cooling panels. *Applied Thermal Engineering* 24(14-15), S. 2055–2072, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.01.017>
- Johnson, H.D.; Vanjonack, W.J. (1976): Effects of Environmental and Other Stressors on Blood Hormone Patterns in Lactating Animals. *Journal of dairy science* 59(9), S. 1603–1617, [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(76\)84413-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(76)84413-X)
- Jungbluth, T.; Büscher, W.; Krause, M. (2005): *Technik Tierhaltung*, Stuttgart, Ulmer, 1. Aufl.
- Kamada, T.; Notsuki, I. (1985): Effects of Environmental Temperature, Humidity and Air Movement on Heat Loss Particularly that of Latent Heat, from the pig. *Nihon Chikusan Gakkaiho* 58(2), S. 147–154, <https://doi.org/10.2508/chikusan.58.147>
- Keck, M.; Büscher, W.; Jungbluth, T. (1995): Ammoniakfreisetzung aus der Schweinehaltung. Einflußfaktoren und Minderungsmaßnahmen. *LANDTECHNIK* 50(6), 374–375
- Kempf, K. (2018): *KonLuft - Anweisungen und Protokolle (Internes Dokument)*, Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover, Institut für Tierhygiene, Tierschutz und Nutztierethologie
- Kerr, B.J.; Yen, J.T.; Nienaber, J.A.; Easter, R.A. (2003): Influences of dietary protein level, amino acid supplementation and environmental temperature on performance, body composition, organ weights and total heat production of growing pigs. *Journal of Animal Science* 81(8), S. 1998–2007, <https://doi.org/10.2527/2003.8181998x>
- Khond, V. (2011): Experimental investigation of desert cooler performance using four different cooling pad materials. *American Journal of Scientific and Industrial Research* 2(3), S. 418–421, <https://doi.org/10.5251/ajsir.2011.2.3.418.421>
- King, R.H. (2000): Factors that influence milk production in well-fed sows. *Journal of animal science* 78(suppl\_3), S. 19, [https://doi.org/10.2527/2000.78suppl\\_319x](https://doi.org/10.2527/2000.78suppl_319x)

Klein-Tank, A.M.G.; Können, G.P. (2003): Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946–99. *Journal of Climate* 16(22), S. 3665–3680, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3665:TIIODT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3665:TIIODT>2.0.CO;2)

Koca, R.W.; Hughes, W.C.; Christianson, L.L. (1991): Evaporative Cooling Pads: Test Procedure and Evaluation. *Applied Engineering in Agriculture* 7(4), S. 485–490, <https://doi.org/10.13031/2013.26250>

Köfer, J.; Awad-Masalmeh, M.; Thiemann, G. (1993): The effect of husbandry, management and stall climate on lung changes in swine. *Deutsche Tierärztliche Wochenschrift* 100(8), S. 319–322

Kouba, M.; Hermier, D.; Le Dividich, J. (2001): Influence of a high ambient temperature on lipid metabolism in the growing pig. *Journal of Animal Science* 79(1), S. 81, <https://doi.org/10.2527/2001.79181x>

Kovats, R.S.; Valentini, R.; Bouwer, L.M.; Georgopoulou, E.; Jacob, D.; Martin, E.; Rounsevell, M.; Soussana, J.F. (2014): Europe. In: *Climate change 2014. Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Global and Sectoral Aspects Working. Group II contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Hg. Field, C.B.; Barros, V.R. et al., New York NY, Cambridge University Press, S. 1267–1326

Krommweh, M.S.; Rösmann, P.; Büscher, W. (2014): Investigation of heating and cooling potential of a modular housing system for fattening pigs with integrated geothermal heat exchanger. *Biosystems Engineering* 121(3), S. 118–129, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.02.008>

Krupa, S.V. (2003): Effects of atmospheric ammonia (NH<sub>3</sub>) on terrestrial vegetation. A review. *Environmental Pollution* 124(2), S. 179–221, [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00434-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00434-7)

Kuhlmann, F. (2021): Landwirtschaft und Klimawandel. Stimmt die Rechnung. *Berichte über Landwirtschaft. Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft* 99(2), S. 2–26

- Larriestra, A.J.; Wattanaphansak, S.; Neumann, E.J.; Bradford, J.; Morrison, R.B.; Deen, J. (2006): Pig characteristics associated with mortality and light exit weight for the nursery phase. *The Canadian Veterinary Journal* 47(6), S. 560–566
- Le L. Bellego; J. van Milgen; J. Noblet (2002): Effect of high temperature and low-protein diets on the performance of growing-finishing pigs. *Journal of animal science* (80), S. 691–701
- Leuschner, C.; Schipka, F. (2004): *Vorstudie Klimawandel und Naturschutz in Deutschland*. BfN-Skripten 115, Bonn
- Liao, C.-M.; Chiu, K.-H. (2002): Wind tunnel modeling the system performance of alternative evaporative cooling pads in Taiwan region. *Building and Environment* 37(2), S. 177–187, [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00098-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00098-6)
- Liao, C.-M.; Singh, S.; Wang, T.-S. (1998): Characterizing the performance of alternative evaporative cooling pad media in thermal environmental control applications. *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 33(7), S. 1391–1417, <https://doi.org/10.1080/10934529809376795>
- Liljequist, G.H.; Cihak, K. (1984): *Allgemeine Meteorologie*, Braunschweig, Vieweg, 3. Aufl.
- Loeffler, K.; Gäbel, G. (2009): *Anatomie und Physiologie der Haustiere*, Stuttgart, Ulmer, 12. Aufl.
- Lopez, J.; Jesse, G.W.; Becker, B.A.; Eilersieck, M.R. (1991): Effects of temperature on the performance of finishing swine. I. Effects of a hot, diurnal temperature on average daily gain, feed intake, and feed efficiency. *Journal of Animal Science* 69(5), S. 1843–1849, <https://doi.org/10.2527/1991.6951843x>
- Lucas, E.M.; Randall, J.M.; Meneses, J.F. (2000): Potential for Evaporative Cooling during Heat Stress Periods in Pig Production in Portugal (Alentejo). *Journal of Agricultural Engineering Research* 76(4), S. 363–371, <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0550>
- Main, R.G.; Dritz, S.S.; Tokach, M.D.; Goodband, R.D.; Nelssen, J.L. (2004): Increasing weaning age improves pig performance in a multisite production system. *Journal of animal science* 82(5), S. 1499–1507

- Maisack, C.; Felde, B. (2019): Tierschutz bei Außenklimaställen und Ställen mit Auslauf ins Freie. *Natur und Recht* 41(3), S. 170–180, <https://doi.org/10.1007/s10357-019-3486-7>
- Martens, W.; Martinec, M.; Zapirain, R.; Stark, M.; Hartung, E.; Palmgren, U. (2001): Reduction potential of microbial, odour and ammonia emissions from a pig facility by biofilters. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* (Volumen 203, Issue 4), S. 335–345
- Martínez, P.; Ruiz, J.; Martínez, P.J.; Kaiser, A.S.; Lucas, M. (2018): Experimental study of the energy and exergy performance of a plastic mesh evaporative pad used in air conditioning applications. *Applied Thermal Engineering* 138, S. 675–685, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.065>
- Maskal, J.; Cabezón, F.A.; Schinckel, A.P.; Marchant-Forde, J.N.; Johnson, J.S.; Stwalley, R.M. (2018): Evaluation of floor cooling on lactating sows under mild and moderate heat stress 1. *The Professional Animal Scientist* 34(1), S. 84–94, <https://doi.org/10.15232/pas.2017-01661>
- Matteri, R.L.; Carroll, J.A.; Dyer, C.J. (2000): Neuroendocrine responses to stress. In: *The biology of animal stress. Basic principles and implications for animal welfare.* Hg. Moberg, G.P.; Mench, J.A., Wallingford, CABI Publishing, S. 43–76
- McGlone, J.J.; Stansbury, W.F.; Tribble, L.F. (1988a): Management of Lactating Sows during Heat Stress. Effects of Water Drip, Snout Coolers, Floor Type and a High Energy-Density Diet. *Journal of animal science* 66(4), S. 885, <https://doi.org/10.2527/jas1988.664885x>
- McGlone, J.J.; Stansbury, W.F.; Tribble, L.F.; Morrow, J.L. (1988b): Photoperiod and Heat Stress Influence on Lactating Sow Performance and Photoperiod Effects on Nursery Pig Performance. *Journal of animal science* 66(8), S. 1915, <https://doi.org/10.2527/jas1988.6681915x>
- Meinke, I.; Maneke, M.; Riecke, W.; Birger, T. (2014): Norddeutscher Klimamonitor – Klimazustand und Klimaentwicklung in Norddeutschland innerhalb der letzten 60 Jahre (1951–2010)

- Meissner, P. (2004): Analyse und Bewertung des Emissionsverhaltens eines einstreulosen Mastschweinestalles mit Spülmistung im Vergleich zu Güllelagerung im Stall. Dissertation, Universität Göttingen
- Meyer, E. (2012): Checkliste zur Vermeidung von Verhaltensstörungen. [https://www.landwirtschaft.sachsen.de/download/Checkliste\\_SchweineHaltSachsen\\_06\\_2021.pdf](https://www.landwirtschaft.sachsen.de/download/Checkliste_SchweineHaltSachsen_06_2021.pdf), Zugriff am 04.2.2022
- Miller, C.J.; Howden, S.M.; Jones, R.N. (2010): Intensive livestock industries. In: Adapting Agriculture to Climate Change. Preparing Australian Agriculture, Forestry and Fisheries for the Future. Hg. Stokes, C.; Howden, M., Australia, CSIRO Publishing, S. 171–185
- Monteith, J.L. (Ed.) (1974): Heat Loss from Animals and Man. Assessment and Control, Burlington, Elsevier Science
- Morrison, S.R.; Heitman, H.; Givens, R.L. (1975): Effect of diurnal air temperature cycles on growth and food conversion in pigs. *Animal Science* 20(2), pp. 287–291, <https://doi.org/10.1017/s0003356100035297>
- Mount, L.E. (1968): The climatic physiology of the pig, London, Arnold
- Mount, L.E. (1974): The concept of thermal neutrality. In: Heat Loss from Animals and Man. Assessment and Control. Ed. Monteith, J.L., Burlington, Elsevier Science, pp. 425–439
- Mount, L.E. (1979): Adaptation to thermal environment. Man and his productive animals, London, Arnold
- Mount, L.E.; Ingram, D.L. (1965): The Effects of Ambient Temperature and Air Movement on Localized Sensible Heat-Loss from the Pig. *Research in Veterinary Science* 6(1), S. 84–91, [https://doi.org/10.1016/S0034-5288\(18\)34769-6](https://doi.org/10.1016/S0034-5288(18)34769-6)
- Müller, H.-J.; Stollberg, U.; Venzlaff, F.-W. (2005): Erdwärmetauscher in der Sauenaufzucht. Eine Möglichkeit zur Verbesserung des Stallklimas und zur Emissionsminderung. *Agrartechnische Forschung* 11(4), S. 92–99
- Mun, H.S.; Dilawar, M.A.; Jeong, M.G.; Rathnayake, D.; Won, J.S.; Park, K.W.; Lee, S.R.; Ryu, S.B.; Yang, C.J. (2020): Effect of a Heating System Using a Ground Source Geothermal Heat Pump on Production Performance, Energy-Saving and

- Housing Environment of Pigs. *Animals* : an open access journal from MDPI 10(11), S. 2075, <https://doi.org/10.3390/ani10112075>
- Nääs, I.A.; Garcia, R.G.; Caldara, F.R. (2014): Infrared thermal image for assessing animal health and welfare. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology* 2(3), 66 - 72-72, <https://doi.org/10.14269/2318-1265/jabb.v2n3p66-72>
- Nienaber, J.A.; Hahne, J.; Yen, J. (1987): Thermal Environment Effects on Growing-Finishing Swine Part I—Growth, Feed Intake and Heat Production. *Transactions of the ASAE* 30(6), pp. 1772–1775, <https://doi.org/10.13031/2013.30635>
- NWSCR (2014): Livestock Hot Weather Stress. Regional Operations Manual Letter C 31-76. National Weather Service Central Region (NWSCR). Kansas City, Missouri, USA (1976). In: Klimabedingungen in norddeutschen Sauenställen. *Züchtungskunde* 86, (3) S. 200-211, 2014. Hg. *Züchtungskunde* 86, (3) S. 200-211, 2014, Stuttgart
- Paar, G.; Blankenberg, J.; Reinz, R.; Sittel, E.; Böttger, H.; Schmidt, P. (1990): Zulufttemperaturbeeinflussung mit Hilfe eines Erdreichwärmeübertragers in einem Putenstall. *Agrartechnik* 10(1), 33-36
- Panagakos, P.; Axaopoulos, P. (2006): Simulation comparison of evaporative pads and fogging on air temperatures inside a growing swine building. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 49(1), S. 209–215, <https://doi.org/10.13031/2013.20240>
- Pang, Z.; Li, B.; Xin, H.; Xi, L.; Cao, W.; Wang, C.; Li, W. (2011): Field evaluation of a water-cooled cover for cooling sows in hot and humid climates. *Biosystems Engineering* 110(4), S. 413–420, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.08.012>
- Patience, J.F.; Umboh, J.F.; Chaplin, R.K.; Nyachoti, C.M. (2005): Nutritional and physiological responses of growing pigs exposed to a diurnal pattern of heat stress. *Livestock Production Science* 96(2-3), S. 205–214, <https://doi.org/10.1016/j.livprodsci.2005.01.012>
- Penzlin, H.; Beinbrech, G. (2005): *Lehrbuch der Tierphysiologie*, Heidelberg, Elsevier Spektrum Akad. Verl., 7. Aufl.



- Pertagnol, J. (2013): Untersuchung zu verschiedenen Zuluffführungs- und Kühlmöglichkeiten in Mastschweineeställen. FORSCHUNGSBERICHT AGRARTECHNIK des Fachausschusses Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) 526. Dissertation, Universität Hohenheim
- Philippe, F.-X.; Laitat, M.; Canart, B.; Vandenheede, M.; Nicks, B. (2007): Comparison of ammonia and greenhouse gas emissions during the fattening of pigs, kept either on fully slatted floor or on deep litter. *Livestock Science* 111(1-2), S. 144–152, <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2006.12.012>
- Plonait, H.; Bickhardt, K. (Hg.) (1997): Lehrbuch der Schweinekrankheiten. 63 Tabellen, Berlin, Parey, 2. Aufl.
- Prange, H. (Hg.) (2004): Gesundheitsmanagement Schweinehaltung. 248 Tabellen, Stuttgart, Ulmer
- Prunier, A.; Bragança, M.M. de; Le Dividich, J. (1997): Influence of high ambient temperature on performance of reproductive sows. *Livestock Production Science* 52(2), S. 123–133, [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(97\)00137-1](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(97)00137-1)
- Purwanto, B.P.; Abo, Y.; Sakamoto, R.; Furumoto, F.; Yamamoto, S. (1990): Diurnal patterns of heat production and heart rate under thermoneutral conditions in Holstein Friesian cows differing in milk production. *The Journal of Agricultural Science* 114(02), S. 139–142, <https://doi.org/10.1017/S0021859600072117>
- Quiniou, N.; Dubois, S.; Noblet, J. (2000): Voluntary feed intake and feeding behaviour of group-housed growing pigs are affected by ambient temperature and body weight. *Livestock Production Science* 63(3), S. 245–253, [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(99\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(99)00135-9)
- Quiniou, N.; Noblet, J. (1999): Influence of High Ambient Temperatures on Performance of Multiparous Lactating Sows. *American Society of Animal Science* 77(8), S. 2124–2134
- Rahmstorf, S. (2003): The current climate. *Nature* (421), S. 699
- Randall, J.M. (1983): Humidity and water vapour transfer in finishing piggeries. *Journal of Agricultural Engineering Research* 28(5), S. 451–461, [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(83\)90136-1](https://doi.org/10.1016/0021-8634(83)90136-1)

- Ratschow, J.-P.; Schulte-Sutrum, R.; Büscher, W.; Nannen, C.; Feller, B. (2008): DLG-Merkblatt 346 - Kühlung von Schweineställen. Fachzentrum Land- und Ernährungswirtschaft. DLG-Ausschuss Technik in der tierischen Produktion. DLG e.V., Frankfurt am Main, Frankfurt am Main, 2. Aufl.
- Rawangkul, R.; Khedari, J.; Hirunlabh, J.; Zeghmati, B. (2008): Performance analysis of a new sustainable evaporative cooling pad made from coconut coir. *International Journal of Sustainable Engineering* 1(2), S. 117–131, <https://doi.org/10.1080/19397030802326726>
- Renaudeau, D. (2005): Effects of short-term exposure to high ambient temperature and relative humidity on thermoregulatory responses of European (Large White) and Caribbean (Creole) restrictively-fed growing pigs. *Animal Research* 54(2), S. 81–93, <https://doi.org/10.1051/animres:2005005>
- Renaudeau, D.; Collin, A.; Yahav, S.; Basilio, V. de; Gourdine, J.L.; Collier, R.J. (2012): Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. *Animal : an international journal of animal bioscience* 6(5), pp. 707–728, <https://doi.org/10.1017/S1751731111002448>
- Renaudeau, D.; Giorgi, M.; Silou, F.; Weisbecker, J.L. (2006a): Effect of Breed (Lean or Fat Pigs) and Sex on Performance and Feeding Behaviour of Group Housed Growing Pigs in a Tropical Climate. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 19(4), pp. 593–600, <https://doi.org/10.5713/ajas.2006.593>
- Renaudeau, D.; Kerdoncuff, M.; Anaïs, C.; Gourdine, J.L. (2008): Effect of temperature level on thermal acclimation in Large White growing pigs. *Animal* 2(11), S. 1619–1626, <https://doi.org/10.1017/S1751731108002814>
- Renaudeau, D.; Leclercq-Smekens, M.; Herin, M. (2006b): Differences in skin characteristics in European (Large White) and Caribbean (Creole) growing pigs with reference to thermoregulation. *Animal Research* 55(3), pp. 209–217, <https://doi.org/10.1051/animres:2006012>
- Renaudeau, D.; Noblet, J. (2001): Effects of exposure to high ambient temperature and dietary protein level on sow milk production and performance of piglets. *Journal of animal science* 79(6), S. 1540–1548

- Renaudeau, D.; Noblet, J.; Dourmad, J.Y. (2003): Effect of ambient temperature on mammary gland metabolism in lactating sows<sup>1,2</sup>. *Journal of animal science* 81(1), S. 217–231, <https://doi.org/10.2527/2003.811217x>
- Rodrigues, V.C.; da Silva, I.J.O.; Vieira, F.M.C.; Nascimento, S.T. (2011): A correct enthalpy relationship as thermal comfort index for livestock. *International journal of biometeorology* 55(3), pp. 455–459, <https://doi.org/10.1007/s00484-010-0344-y>
- Rohlmann, C.; Verhaagh, M.; Efken, J. (2021): *Steckbriefe zur Tierhaltung in Deutschland: Ferkelerzeugung und Schweinemast*, Braunschweig
- Rolle, M.; Mayr, A.; Bachmann, P.A. (1984): *Medizinische Mikrobiologie, Infektions- und Seuchenlehre für Tierärzte, Biologen und Agrarwissenschaftler. Lehrbuch für Praxis u. Studium : 209 Abb.,139 Tab*, Stuttgart, Enke, 5. Aufl.
- Rudovsky, A. (2004): Stallklima. In: *Gesundheitsmanagement Schweinehaltung*. 248 Tabellen. Hg. Prange, H., Stuttgart, Ulmer, S. 166–171
- Sada, O.; Reppo, B. (2009): Effect of animal keeping technologies on the pigsty inner climate in summer. In: *8th International Scientific Conference Engineering for Rural Development 28.-29.05.2009 Jelgava, LATVIA*. Hg. Latvia University of Agriculture, S. 70–75
- Samer, M. (2013): Towards the implementation of the Green Building concept in agricultural buildings: a literature review. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 15(2), S. 25–46
- Samer, M.; Abdelsalam, E.; Abd Elhay, Y.B. (2015): Enhancing the efficiency of evaporative cooling pads for livestock barns and greenhouses by moisture adsorption. *Agricultural Engineering International* 17(4), 36-63
- Samer, M.; Hatem, M.; Grimm, H.; Doluschitz, R.; Jungbluth, T. (2012): An expert system for planning and designing dairy farms in hot climates. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 14(1), S. 1–15
- Samer, M.; Loebstin, C.; Fiedler, M.; Ammona, C.; Berg, W.; Sanftleben, P.; Brunsch, R. (2011): Heat balance and tracer gas technique for airflow rates measurement and gaseous emissions quantification in naturally ventilated livestock buildings. *Energy and Buildings* 43(12), S. 3718–3728, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.008>

- Scharf, P. (2004): Einfluss einer biologischen Abluftreinigungsanlage auf die Emission von Mikroorganismen und Endotoxinen aus einem Entenmaststall. Dissertation, Freien Universität Berlin
- Schoenherr, W.D.; Stahly, T.S.; Cromwell, G.L. (1989): The Effects of Dietary Fat or Fiber Addition on Yield and Composition of Milk from Sows Housed in a Warm or Hot Environment. *Journal of animal science* 67(2), S. 482, <https://doi.org/10.2527/jas1989.672482x>
- Seedorf, J. (2002): Emissions of airborne dust and micro-organisms. *LANDTECHNIK–Agricultural Engineering* 55(2), S. 182–183
- Serres, H. (1992): *Manual of pig production in the tropics*, Wallingford, CAB International
- Silva, I.J.O.d.; Barbosa Filho, J.A.D.; Silva, M.A.N.d.; Piedade, S.M.d.S. (2006): Influência do sistema de criação nos parâmetros comportamentais de duas linhagens de poedeiras submetidas a duas condições ambientais. *Revista Brasileira de Zootecnia* 35(4), S. 1439–1446, <https://doi.org/10.1590/S1516-35982006000500025>
- Simmons, J.D.; Lott, B.D. (1996): Evaporative Cooling Performance Resulting from Changes in Water Temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 12(4), S. 497–500, <https://doi.org/10.13031/2013.25676>
- Smidt, D. (1991): Wissenschaftliche Strategien zur Beurteilung tiergerechter Nutztierhaltung. *Tierzucht : Fachzeitschrift für Tierzucht, Fütterung u. Haltung* 45(6), S. 257–259
- Sousa de, P.; Pedersen, S. (2004): Ammonia Emission from Fattening Pig Houses in Relation to Animal Activity and Carbon Dioxide Production, Denmark
- Spencer, J.D.; Boyd, R.D.; Cabrera, R.; Allee, G.L. (2003): Early weaning to reduce tissue mobilization in lactating sows and milk supplementation to enhance pig weaning weight during extreme heat stress. *Journal of animal science* 81(8), S. 2041–2052
- Standke, K.; Büscher, W. (2011): Ammoniakemissionen aus Tierställen als Vorläufersubstanz für die sekundäre Partikelbildung. *Landwirtschaftliche Fakultät*

der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes  
USL, Nr. 166, Bonn

Stansbury, W.F.; McGlone, J.J.; Tribble, L.F. (1987): Effects of season, floor type, air temperature and snout coolers on sow and litter performance. *Journal of animal science* 65(6), S. 1507–1513

Steinbach, J. (1987): Chapter 13. Swine. Effects of the tropical climate on the physiology and productivity of the pig. In: *Bioclimatology and the adaptation of livestock*. Ed. Johnson, H.D., Amsterdam, Elsevier, pp. 181–199

Stephan, K.; Mayinger, F. (1992): *Thermodynamik. Band 1: Einstoffsysteme. Grundlagen und technische Anwendungen*, Berlin, Heidelberg/S.l., Springer Berlin Heidelberg, 14. Aufl.

Straw, B.E.; Dewey, C.E.; Bürgi, E.J. (1998): Patterns of crossfostering and piglet mortality on commercial U.S. and Canadian swine farms. *Preventive Veterinary Medicine* 33(1-4), S. 83–89, [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(97\)00051-2](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(97)00051-2)

Sturm, B.; Müller, S.; Quiniou, N.; Raut, S.; Graef, H.; Lange, A.; Nasirahmadi, A. (2021): Impact of environmental conditions on activity patterns in growing pigs. IN: *Canadian Society for Bioengineering, Integrating agriculture and society through engineering: 5th CIGR International Conference 2021*, Canadian Society for Bioengineering

Sundrum, A. (Hg.) (1994): *Tiergerechtheitsindex 200. Ein Leitfaden zur Beurteilung von Haltungssystemen*, Bonn, Inst. für Organischen Landbau

Suriyasomboon, A.; Lundeheim, N.; Kunavongkrit, A.; Einarsson, S. (2006): Effect of temperature and humidity on reproductive performance of crossbred sows in Thailand. *Theriogenology* 65(3), pp. 606–628, <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2005.06.005>

Thom, E.C. (1959): The Discomfort Index. *Weatherwise* 12(2), S. 57–61

TierSchNutzV § 22 Abschnitt 5: Anforderungen an das Halten von Schweinen.  
Allgemeine Anforderungen an Haltungseinrichtungen für Schweine.  
Ausfertigungsdatum 25.10.2001, S. 16

- Timmons, M.B.; Baughman, G.R. (1983): experimental evaluation of poultry mist-fog systems. Transactions of the ASAE 26(1), S. 207–210, <https://doi.org/10.13031/2013.33905>
- Troxler, J. (1981): Tierverhalten als Grundlage zur Beurteilung von Haltungssystemen. Schweizerische Landwirtschaftliche Monatshefte 1981(58), S. 171–176
- van Caenegem, L.; Deglin, D. (1997): Erdwärmetauscher für Schweineställe: Erdwärmetauscher wirtschaftlich, wenn das ausgeglichene Stallklima zu besseren Tierleistungen führt. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), Tänikon
- van Caenegem, L.; Wechsler, B. (2000): Stallklimawerte und ihre Berechnung. Schriftenreihe der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik Nr. 51, Tänikon
- van Putten, G. (1978): Schwein. In: Nutztierethologie. Das Verhalten landwirtschaftlicher Nutztiere - Eine angewandte Verhaltenskunde für die Praxis. Hg. Sambras, H.H., Berlin, Hamburg, Parey, S. 168–213
- VDI 4251 Blatt 1 (2019): Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft - Planung von anlagenbezogenen Bioaerosolmessungen, Berlin, Beuth Verlag GmbH
- Verein Deutscher Ingenieure (Hg.) (2013): VDI-Wärmeatlas. 11bearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 320 Tabellen, Berlin, Springer Vieweg, 11. Aufl.
- Vitt, R.; Weber, L.; Zollitsch, W.; Hörtenhuber, S.J.; Baumgartner, J.; Niebuhr, K.; Piringer, M.; Anders, I.; Andre, K.; Hennig-Pauka, I.; Schönhart, M.; Schaubberger, G. (2017): Modelled performance of energy saving air treatment devices to mitigate heat stress for confined livestock buildings in Central Europe. Biosystems Engineering 164, S. 85–97, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.013>
- Wagner, S.; Angenendt, E.; Beletskaya, O.; Zeddies, J. (2015): Costs and benefits of ammonia and particulate matter abatement in German agriculture including interactions with greenhouse gas emissions. Agricultural Systems 141, S. 58–68, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.09.003>

- Wagner, W.; Pruss, A. (1993): International Equations for the Saturation Properties of Ordinary Water Substance. Revised According to the International Temperature Scale of 1990. Addendum to J. Phys. Chem. Ref. Data 16 893 (1987). Journal of Physical and Chemical Reference Data 22(3), S. 783–787, <https://doi.org/10.1063/1.555926>
- Wang, C.; Cao, W.; Li, B.; Shi, Z.; Geng, A. (2008): A fuzzy mathematical method to evaluate the suitability of an evaporative pad cooling system for poultry houses in China. Biosystems Engineering 101(3), S. 370–375, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.08.005>
- Warke, D.A.; Deshmukh, S.J. (2017): Experimental Analysis of Cellulose Cooling Pads Used in Evaporative Coolers. International Journal of Energy Science and Engineering 3(4), S. 37–43
- Warriss, P.D.; Pope, S.J.; Brown, L.J.; Wilkins, L.J.; Knowles, T.G. (2006): Estimating the body temperature of groups of pigs by thermal imaging. Veterinary Record 158(10), pp. 331–334, <https://doi.org/10.1136/vr.158.10.331>
- Weber, R. (2003): Wohlbefinden von Mastschweinen in verschiedenen Haltungssystemen unter besonderer Berücksichtigung ethologischer Merkmale. Dissertation, Universität Hohenheim
- Wegner, K. (2014): Untersuchung zu klimatischen Bedingungen in Sauenställen in Norddeutschland und deren Einfluss auf ausgewählte Fruchtbarkeitsparameter von Sauen. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen
- Wegner, K.; Lamberts, C.; Daş, G., Gaulty, Matthias (2014): Klimabedingungen in norddeutschen Sauenställen. Züchtungskunde 86, (3) S. 200-211, 2014, Stuttgart
- Wegner, K.; Lambertz, C.; Das, G.; Reiner, G.; Gaulty, M. (2016): Effects of temperature and temperature-humidity index on the reproductive performance of sows during summer months under a temperate climate. Animal science journal 87(11), pp. 1334–1339, <https://doi.org/10.1111/asj.12569>
- Wiersma, F.; Short, T.H. (1983): Evaporative cooling. In: Ventilation of agricultural structures. Eds. Hellickson, M.A.; Walker, J.N., St. Joseph, Mich., American Society of Agricultural Engineers, pp. 103–118

- Wilson, J.L.; Hughes, H.A.; Weaver, W.D., JR. (1983): Evaporative Cooling with Fogging Nozzles in Broiler Houses. *Transactions of the ASAE* 26(2), S. 557–561, <https://doi.org/10.13031/2013.33978>
- Wittke, G. (1972): *Physiologie der Haustiere. Kurzes Lehrbuch f. Studierende d. Agrarwiss., Veterinärmedizin u. Biologie; mit 9 Tab. u. 2 Übersichten*, Berlin, Hamburg, Parey
- Wolter, B.F.; Ellis, M. (2001): The effects of weaning weight and rate of growth immediately after weaning on subsequent pig growth performance and carcass characteristics. *Canadian Journal of Animal Science* 81(3), S. 363–369, <https://doi.org/10.4141/A00-100>
- Wrachien, D. de; Lorenzini, G. (2006): Modelling Jet Flow and Losses in Sprinkler Irrigation. Overview and Perspective of a New Approach. *Biosystems Engineering* 94(2), S. 297–309, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.02.019>
- Yoon, J.I.; Son, C.H.; Choi, K.H.; Kim, Y.B.; Sung, Y.H.; Roh, S.J.; Kim, Y.M.; Seol, S.H. (2018): Performance characteristic of hybrid cooling system based on cooling pad and evaporator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 297, S. 12070, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/297/1/012070>
- Yousef, M.K. (1985): Chapter 2. Thermal environment. In: *Stress physiology in livestock*. Hg. Yousef, M.K., Boca Raton, Fla., CRC Press, S. 67–74
- Zentner, E. (2006): Einsatz einer Schweinedusche im Hinblick auf Emissionen, tägliche Zunahmen in der Schweinemast und Oberflächentemperaturverhalten von Mastschweinen. Abschlussbericht 3494



## 9 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Professorin Imke Traulsen. Für Ihre Bereitschaft mich über den langen Weg bestmöglich zu unterstützen und die freundliche Übernahme des Gutachten für diese Arbeit anzufertigen.

Bei Professor Wolfgang Büscher für das Koreferat und die tolle Betreuung zur Promotion.

Als zusätzliches Mitglied der Prüfungskommission danke ich Professor Frank Beneke für seine Unterstützung.

Ich danke Dr. Sabrina Elsholz für die hilfsbereite und wissenschaftliche Betreuung während meiner Promotion.

Der Abteilung Systeme der Nutztierhaltung mit Birgit Sonrey und Dr. Steffanie Ammer für die tolle Unterstützung in den vergangenen Jahren.

Professorin Engel F. Hessel für die Einstellung meiner Person und dem Vertrauen zu dem Projekt.

Der BLE für die Förderung der Stelle.

Der Abteilung Agrartechnik mit Harald Krumrey, Siegfried Opolka und Carsten Wilhelm bei der Konstruktion des Moduls.

Dem landwirtschaftlichen Betrieb in Vechta.

Für die tatkräftige Unterstützung am Betrieb mit Heinrich Gansefort (AGSG) und seinem gesamten Team.

Der Firma Möller Agrarklima für die Installation der Technik und dem Support während der Datenaufnahme.

An das Team der Tierärztlichen Hochschule Hannover mit Professor Joachim Schulz und Katrin Kempf, die bei der Feinstaubuntersuchung geholfen haben.

Des Weiteren möchte ich mich bei Uwe und Birgit für die kritische Auseinandersetzung mit meinem Themenkomplex und für die Durchsicht meiner Arbeit danken.

Ein großes Dankeschön gilt meinen Eltern. Die mir meinen bisherigen Lebensweg ermöglichten, stets bestmöglich unterstützten, und nie Zweifel hegten, dass es der Richtige sei.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Frau Katharina für die über die Jahre aufgebrachte Toleranz sowie für die moralische und liebevolle Unterstützung.

## 10 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich eidesstattlich, dass:

1. diese Arbeit weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits anderen Prüfungsbehörden vorgelegen hat.
2. ich mich an keiner anderen Hochschule um einen Doktorgrad beworben habe.

Göttingen, den 01.08.2022

(Unterschrift)

Hiermit erkläre ich eidesstattlich, dass diese Dissertation selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt wurde.

Göttingen, den 01.08.2022

(Unterschrift)

## 11 Anhang

Tab. 1: Klassifizierung der Stallinnentemperaturen (T), der relativen Luftfeuchtigkeit (rH) und des Temperatur-Feuchte-Index (THI) im Untersuchungszeitraum, ausgedrückt als Anzahl an Stunden. Die Stundenmittelwerte wurden auf der Grundlage von 20 Messungen pro Stunde berechnet (Referenzabteil, Deskriptive Analyse).

Durchgang	T				rH			THI			
	≥21	21-25	25-28	≤28	≥50	50-70	≤70	≥70	70-75	75-79	≤79
1	401	223			139	479	6	624			
2	393	230			9	614		624			
3		519	72	33	149	375		470	111	43	
4	5	389	133	98	188	437		318	190	91	26
5	6	393	130	95	191	433		354	143	107	20
6	9	431	115	69	299	319	6	366	156	59	43

## Anhang

Tab. 2: Klassifizierung der Befeuchtung (Hum), Stallinnentemperaturen (T), der relativen Luftfeuchtigkeit (rH) und des Temperatur-Feuchte-Index (THI) im Untersuchungszeitraum, ausgedrückt als Anzahl an Stunden. Die Stundenmittelwerte wurden auf der Grundlage von 20 Messungen pro Stunde berechnet (Versuchsabteil, Deskriptive Analyse)

Durchgang	Befeuchtung	T				rH			THI			
		≥21	21- 25	25- 28	≤28	≥50	50- 70	≤70	≥70	70- 75	75- 79	≤79
1	-	8	618			1	619	4	624			
2	-		623			179	443	1	624			
3	72	2	564	31	6	97	495	11	542	49	12	
4	167	9	515	80	21	24	502	99	516	108	1	
5	246		461	155	8		488	136	468	156		
6	155	7	540	77			527	97	550	74		

## Anhang

Tab1. Lsmeans für Abteil 4 (Referenzabteil) sowie Abteil 5 (Versuchsabteil) im jeweiligen Durchgang. (Stundenmittelwerte).

Durchgang	Temperatur		Relative Luftfeuchtigkeit		THI		NH <sup>3</sup>		Vol		
	Abteil	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5
1		23.94	23.70	53.36	62.62	70.18	68.93	-	-	2762	2633
2		23.74	23.72	55.01	58.27	69.84	69.27	14.45	15.37	2151	1903
3		24.05	23.33	48.95	56.90	70.68	68.90	13.49	8.32	2840	2285
4		23.98	23.51	49.37	66.27	70.53	68.23	9.02	5.23	3172	2706
5		23.81	23.41	53.42	64.94	70.05	68.20	11.76	4.99	3234	2538
6		23.78	23.05	50.78	65.85	70.33	67.74	6.16	5.56	3242	2494

Tab.2: Übersicht der adiabatischen Befeuchtung im Modul

	22. Mai – 01. Oktober 2017	26. April – 3. September 2018
Befeuchtung an ab	21 °C	20 °C
adiabatische Befeuchtung (Tage)	63 (von 103)	90 (von 119)
adiabatische Befeuchtung (Stunden)	492	1.042
Ø Befeuchtung (Stunden/Tag)	7,8 (von 2-12 Stunden)	11,5 (von 1-16 Stunden)
Wasserverbrauch	5,3 m <sup>3</sup>	32,9 m <sup>3</sup>
Stromverbrauch (Modul)	867 kWh	1.891 kWh

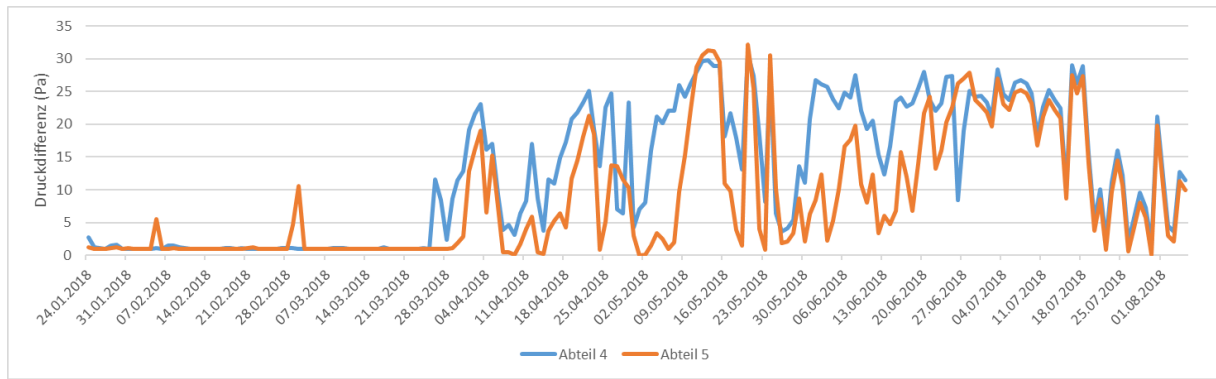


Abbildung 1: Die Druckdifferenzen beider Abteile zeigen einen erwarteten Zusammenhang zu dem Luftvolumenstrom. Ende März / Anfang April steigen beide Linien parallel an. Das Versuchsabteil (Abteil 5) liegt im Durchschnitt 6,5 Pa unter dem Referenzabteil (Abteil 4).