

# Beiträge zum Thema Stallklima in der Tierhaltung



**Arbeitsgruppe „Stallklima und Emissionen“  
der Koordinierungsgruppe Tierhaltung**



## Impressum

Herausgeber

### Redaktionskollegium

Loebstin, Christiane	LFA MV, Institut für Tierproduktion	<a href="mailto:c.loebstin@lfa.mvnet.de">c.loebstin@lfa.mvnet.de</a>
Tober, Olaf	LFA MV, Institut für Tierproduktion	<a href="mailto:o.tober@lfa.mvnet.de">o.tober@lfa.mvnet.de</a>
Sanftleben, Peter	LFA MV, Institut für Tierproduktion	
Amon, Thomas	Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.	<a href="mailto:tamon@atb-potsdam.de">tamon@atb-potsdam.de</a>
Berg, Werner	Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.	<a href="mailto:wberg@atb-potsdam.de">wberg@atb-potsdam.de</a>
Fiedler, Merike	Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.	<a href="mailto:mfiedler@atb-potsdam.de">mfiedler@atb-potsdam.de</a>
Hempel, Sabrina	Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.	<a href="mailto:shempel@atb-potsdam.de">shempel@atb-potsdam.de</a>
Hoffmann, Gundula	Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.	<a href="mailto:ghoffmann@atb-potsdam.de">ghoffmann@atb-potsdam.de</a>
Mening, Jörn	LLFG Sachsen-Anhalt	<a href="mailto:joern.mening@llfg.mlu.sachsen-anhalt.de">joern.mening@llfg.mlu.sachsen-anhalt.de</a>
Heidenreich, Thomas	LfULG Sachsen	<a href="mailto:thomas.heidenreich@smul.sachsen.de">thomas.heidenreich@smul.sachsen.de</a>
Pache, Stefan	LfULG Sachsen	<a href="mailto:stefan.pache@smul.sachsen.de">stefan.pache@smul.sachsen.de</a>
Simon, Jochen	LfL Bayern	<a href="mailto:jochen.simon@lfl.Bayer.de">jochen.simon@lfl.Bayer.de</a>

Die Verantwortung für die Beiträge liegt bei den Autoren.

Dummerstorf, Dezember 2014

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		
	Verzeichnis der Abbildungen	5
	Verzeichnis der Tabellen	6
<b>1</b>	<b>Vorwort</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Belastungszustände Rind: Stressindikatoren bei Hitzestress</b>	<b>8</b>
2.1	Einleitung	8
2.2	Literaturübersicht	11
2.3	Fazit	13
2.4	Literatur	13
<b>3</b>	<b>Untersuchungen zur Herzfrequenzvariabilität von Milchkühen bei verschiedenen Umgebungstemperaturen</b>	<b>16</b>
3.1	Einleitung und Zielstellung	16
3.2	Literaturbetrachtung	16
3.3	Tiere, Material und Methode	18
3.4	Ergebnisse	22
3.5	Diskussion	25
3.6	Literatur	28
<b>4</b>	<b>Minderungsmöglichkeiten von Hitzestress am Beispiel von Zusatzlüftung</b>	<b>31</b>
4.1	Was ist Hitzestress?	31
4.2	Thermoregulation	32
4.3	Unterstützung der Wärmeregulation	33
4.4	Geschwindigkeitsmessungen zum Stallklima	33
4.4.1	Vorstellung des Milchviehstalles	33
4.4.2	Messmethodik zur Geschwindigkeitsmessung	34
4.5	Windprofilmessungen - Kurzzeitmessungen	34
4.6	Windprofilmessungen - Langzeitmessungen	36
4.7	Empfehlungen	40
4.8	Schlussfolgerungen	40
4.9	Weiterführende Untersuchungen und Ausblick	41
4.10	Literatur	41
<b>5</b>	<b>Dachformen und Materialien zur Dacheindeckung im landwirtschaftlichen Bauen und deren Einfluss auf die Stallklimagestaltung</b>	<b>43</b>
5.1	Dachformen	43
5.2	Dacheindeckmaterialien	45
5.3	Dachformen in der Landwirtschaft	46
5.4	Versuchsfragestellungen der Einrichtungen zum Themakomplex Stalldach	46
5.4.1	Klimamessung in frei belüfteten Milchviehställen	47
5.4.2	Einsatz von Sandwichelementen als Dacheindeckung als Maßnahme zur Vermeidung von Hitzestress im Milchkuhstall	49
5.4.3	Einsatz von Ventilatoren zur Zusatzlüftung in Milchviehställen	50
5.4.4	Belüftungskonzepte für Milchviehställe/ Einsatz von Ventilatoren	51
5.4.5	Einfluss der Dachkonstruktion auf die Thermoregulation von Milchkühen	52

5.4.6	Einfluss der Bauweise von Milchviehställen in ein- oder mehrhausige Lösungen auf das Stallklima	53
5.5	Fazit	56
5.6	Literatur	56
<b>6</b>	<b>Möglichkeiten der Messung von Methan- bzw. Stickstoffausscheidungen in der Rinderproduktion über Hilfsparameter aus der Milch, der Fütterung sowie weiterer Quellen</b>	<b>57</b>
6.1	Einführung	57
6.2	Schätzung von Methanemissionen	57
6.3	Angaben zu CH <sub>4</sub> -Emissionsfaktoren für Rinder	59
6.4	Beispiele für Schätzgleichungen und Genauigkeit der Schätzungen	59
6.5	Strategien zur Reduzierung von Methanemissionen im Nutztierbereich	61
6.6	Literatur	64
<b>7</b>	<b>Messung von Emissionen aus frei gelüfteten Gebäuden der Tierhaltung und von Luftwechselraten dieser Gebäude</b>	<b>67</b>
7.1	Einführung	67
7.2	Relevante Emissionen	67
7.3	Messung von Emissionen	68
7.4	Messung von Luftvolumenströmen	70
7.5	Messprotokolle	73
7.6	Ausblick	74
7.7	Literatur	74
<b>8</b>	<b>Schlussfolgerungen zur weiteren Arbeit der Arbeitsgruppe</b>	<b>77</b>

## Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Befestigung des Herzfrequenzmesssystems am Tier .....	19
Abbildung 2: Möglichkeiten der Thermoregulation.....	32
Abbildung 3: Messorte der durchgeführten Luftgeschwindigkeitsmessungen .....	35
Abbildung 4: Gemessene Luftgeschwindigkeiten und -richtung im Milchviehstall ohne Zusatzventilatoren. Länge der Vektorpfeile um Faktor 5 verlängert (FIEDLER ET AL. 2013).....	35
Abbildung 5: Gemessene Luftgeschwindigkeiten und -richtung im Milchviehstall mit Zusatzventilatoren. Länge der Vektorpfeile um Faktor 5 verlängert. ....	36
Abbildung 6: Schematische Darstellung des Stalles mit den drei Messpunkten (ABC) und der Position der Ventilatoren.....	37
Abbildung 7: Mittelwerte der Windgeschwindigkeit (m/s) pro Messpunkt bei offenen oder geschlossenen Jalousien bzw. an- oder ausgeschalteter Lüfter (Anordnung im schematischen Grundriss des Stalles bezogen auf das Jahr 2013) .....	38
Abbildung 8: Anteile der Windgeschwindigkeit > 1 m/s pro Messpunkt (%) bei offenen oder geschlossenen Jalousien bzw. an- oder ausgeschalteten Lüftern (Anordnung im schematischen Grundriss des Stalles bezogen auf das Jahr 2013) .....	39
Abbildung 9: Mittelwert der Windgeschwindigkeit (m/s) pro Messpunkt bei offenen Jalousien bzw. an- oder ausgeschalteten Lüftern und einem Außenwind von 2-3 m/s mit einer Anströmung aus 250° (Anordnung im schematischen Grundriss des Stalles) .....	39
Abbildung 10: Schematische Darstellung verschiedener Dachformen (Quelle: Dachdeckerforum) .....	44
Abbildung 11: Außen- und Innenansicht des untersuchten Milchviehstalles .....	47
Abbildung 12: Temperaturschichtung im untersuchten Stall an 3 Sommertagen mit dazugehöriger Anordnung der Messpunkte .....	48
Abbildung 13: Temperaturverlauf in einem Stall mit und einem ohne wärme gedämmten Dach .....	48
Abbildung 14: Stallneubau mit Dacheindeckung aus Sandwichelementen .....	49
Abbildung 15: beispielhafte Tagesverläufe der Temperaturen an den Messstellen .....	49
Abbildung 16: Beispielhafte Darstellung der Messergebnisse .....	50
Abbildung 17: Im Versuch betrachtete Ventilatoren.....	51
Abbildung 18: Beispiel für Messergebnisse .....	52
Abbildung 19: Empfohlene Anordnung von Lichtplatten (links) und ungünstige Anordnung (rechts) .....	53
Abbildung 20: Temperaturverlauf begrüntes Dach .....	54
Abbildung 21: Veröffentlichung der LfL zur Dachbegrünung.....	55

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	FormelAuswahl zur Berechnung von Hitzestressparametern im Rinder- und Humanbereich.....	9
Tabelle 2:	Mögliche Hitzestress-Indikatoren .....	10
Tabelle 3:	Datum der Durchführung und Mittelwerte sowie Spannweiten der erfassten Stallklimadaten während der Messungen .....	20
Tabelle 4:	Untersuchte Parameter der Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität .....	21
Tabelle 5:	Verwendete Modelle und Testergebnisse der fixen Effekte mit drei Messzeitpunkten (kalt, Übergang und warm), n= 7.....	23
Tabelle 6:	Verwendete Modelle und Testergebnisse der fixen Effekte mit zwei Messzeitpunkten (Übergang und warm), n= 16 .....	23
Tabelle 7:	Adjustierte Mittelwerte und Standardfehler der untersuchten Merkmale sowie die mittlere Milchleistung der Tiere am Messtag bei drei Messzeitpunkten (kalt, Übergang und warm), n= 7.....	24
Tabelle 8:	Adjustierte Mittelwerte <sup>1)</sup> und Standardfehler der untersuchten Merkmale sowie die mittlere Milchleistung der Tiere am Messtag bei zwei Messzeitpunkten (Übergang und warm), n= 16 .....	24
Tabelle 9:	Anzeichen und Auswirkungen von Hitzestress (nach HEIDENREICH, 2009; ZENTNER, 2008) .....	31
Tabelle 10:	Einflussfaktoren auf die Methanausscheidung über Fermentationsvorgänge im Vormagen (nach SEJIAN ET AL. 2011) .....	58
Tabelle 11:	Kanadische Rinder-Methan-Emissionsfaktoren (nach BOADI ET AL. 2004) .....	59
Tabelle 12:	Milchproduktion und Methanemission von Milchkühen (nach CHASE 2008) ....	59
Tabelle 13:	Übersicht über publizierte Gleichungen zur Schätzung der Methanausscheidung von Fleischrindern und Milchkühen sowie mittlere Standardfehler der Modelle (nach ELLIS ET AL. 2007) .....	61
Tabelle 14:	Strategien zur Reduzierung von Methanausscheidungen im Nutztierbereich (nach SEJIAN ET AL. 2011).....	62
Tabelle 15:	Zusammenfassung von Methanreduzierungsstrategien für Milchkühe (nach BOADI ET AL. 2004) .....	62

## **1 Vorwort**

*C. Loebstin*

Die landwirtschaftliche Forschung wird geprägt von neuen Herausforderungen hinsichtlich des Klimawandels, des Tierwohls und der Verbraucherakzeptanz verbunden mit einem noch bewussteren Umgang der natürlichen und anderer Ressourcen.

Gleichzeitig knapper werdende Kapazitäten auf dem Gebiet der angewandten Agrarforschungen bedingen deshalb eine Bündelung und Vernetzung dieser mit dem Ziel einer optimalen Nutzung materieller und personeller Ressourcen und Schaffung von Synergien.

Mit der Gründung der länderübergreifenden Kooperationsvereinbarung zwischen den Landeseinrichtungen und der daraus resultierenden Koordinierungsgruppe Tierproduktion wurde ein Arbeitsfeld „Umwelt und Klimawandel“ definiert, welches sich vordergründig mit den Aufgabengebieten Stallklima und Emissionen auseinandersetzt. Mit dieser Arbeitsgruppe wurde ein Instrument geschaffen, welches eine qualifizierte fachliche Kooperation zwischen den Landeseinrichtungen von Mecklenburg-Vorpommern, Thüringen, Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Sachsen sowie dem Leibniz-Institut ATB hervorgebracht hat.

Umwelt- und tiergerechte Verfahren bei einer gleichzeitigen Wirtschaftlichkeit sind die Eckpunkte einer modernen wettbewerbsfähigen Tierproduktion. Dazu sind Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen Stallklimaparameter und deren Umsetzung in die Verfahren der Stallklimagestaltung unverzichtbar. In gleicher Weise stellen veränderte Klimabedingungen insbesondere gekennzeichnet durch zunehmende Temperaturextreme auf der einen Seite und der Wunsch nach gesunden langlebigen Hochleistungstieren auf der anderen Seite die Tierproduzenten vor neue Herausforderungen. Fokussiert auf diese Themen, hat sich die Arbeitsgruppe einer Reihe von Projekten vorrangig auf dem Gebiet des Milchrindes gewidmet, die in der vorliegenden Broschüre dargelegt werden.

## 2 Belastungszustände Rind: Stressindikatoren bei Hitzestress

G. Hoffmann, M. Fiedler, O. Tober

### 2.1 Einleitung

Das Stallklima trägt erheblich zum Wohlbefinden und der Leistungsfähigkeit von Milchkühen bei. Die meisten Milchkühe verbringen heutzutage ihre gesamte Lebenszeit im Stall. Das Wohlbefinden der Tiere hängt dabei entscheidend vom Stallklima ab. Die Angaben zur Wohlfühltemperatur der Milchkühe sind jedoch unterschiedlich. So fühlen sie sich nach BIANCA (1976) bei Temperaturen zwischen 0 und 15 °C am wohlsten, wohingegen im Merkblatt 336 der DLG (2005) ein Optimum von 4 °C bis 16 °C genannt wird. MAHLKOW-NERGE (2007) beschreibt sogar einen Bereich von -7 °C bis 17 °C als Optimalbereich.

Die heutige hohe Milchproduktion verlangt dem Stoffwechsel der Milchkühe Leistungen, vergleichbar den Höchstleistungen von Spitzensportlern, ab und setzt viel metabolische Wärme frei. Kann diese Wärme nicht ausreichend abgegeben werden, z.B. bei zu hohen Umgebungstemperaturen, kommt es zu einer Hitzebelastung (Hitzestress) der Tiere. Die Folgen einer nicht kompensierbaren Hitzebelastung sind vielfältig, so wird z.B. ein Anstieg der Körpertemperatur und eine Abnahme der Futteraufnahme beobachtet, was wiederum eine verminderte Milchleistung und -qualität zur Folge hat (WEST, 2003).

Zur Vermeidung von Hitzestress muss eine ausreichende Belüftung des Stallgebäudes erfolgen, um Temperatur und Feuchtigkeit im optimalen Bereich zu halten. Dennoch kann es Situationen geben (z.B. bei auftretenden Hitzewellen oder wenn die Tiere dicht gedrängt im Vorwartehof des Melkstandes stehen) bei denen es - trotz ausreichender Belüftung - zu einer Hitzebelastung kommen kann. In solchen Situationen sollten zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden, die die natürliche Thermoregulation der Tiere unterstützen, wie z.B. die Erhöhung der Luftgeschwindigkeit oder Wasserkühlung durch Sprinklersysteme. Allerdings stellt sich hierbei die Frage, ab wann eine zusätzliche Kühlung notwendig ist. Dazu ist eine Einschätzung der Hitzestressbelastung der Kühe notwendig bzw. eine gute stallklimatische Einschätzung des Tierhalters. Es gibt allerdings auch messbare Bewertungsparameter zur Beurteilung der Hitzestresssituation der Tiere. Der meistverwendete Parameter ist der Temperature-Humidity Index (THI), der aus Lufttemperatur und -feuchte berechnet wird. Es gibt jedoch mittlerweile verschiedene Formeln, den THI zu berechnen, wie z.B. von Walter und LÖPMEIER (2010) dargestellt. Der THI berücksichtigt jedoch keine zusätzlichen Kühleffekte durch Windgeschwindigkeit und vernachlässigt auch andere Effekte wie z.B. die Strahlung. Diese finden in weniger bekannten Parametern wie z.B. dem Temperature-Humidity Velocity Index (THVI) oder dem Heat-Load-Index (HLI) Berücksichtigung (GAUGHAN ET AL., 2008; MADER ET AL., 2006). Formeln zu diesen und weiteren Klimaparametern sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Ein Nachteil aller dieser Bewertungsparameter ist jedoch die Betrachtung von lediglich rein klimatischen Bedingungen; es fehlen nach wie vor Kriterien, die eine körperliche Belastung des Tieres berücksichtigen. Aus diesem Grund wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um einen Überblick zu geben, welche tierindividuellen Parameter bisher verwendet wurden, um Hitzestressbelastungen bei Kühen zu beurteilen. Denn beim THI bleibt die individuelle Betrachtung des Tieres außen vor und nur generelle und indirekte Parameter werden in die Auswertung mit einbezogen. In einigen Studien wurden aber schon tierbezogene Parameter mit betrachtet. Die vorliegende Zusammenfassung gibt daher einen Überblick über die verschiedenen bisher verwendeten Hitzestressindikatoren, mit dem Fokus auf tierindividuellen Indikatoren (Tabelle 2).

**Tabelle 1: Formelwahl zur Berechnung von Hitze stressparametern im Rinder- und Humanbereich**

Bezeichnung	Abk.	Quelle	Formel	Anmerkung
Temperature-Humidity Index (Rind)	<b>THI</b>	verschiedene	siehe Übersicht von Walter und Löpmeier (2010)	
Temperature-Humidity Velocity Index (Rind)	<b>THVI</b>	Mader et al., 2006	$[4,51 + \text{THI} - (1,992 \times V) + (0,0068 \times \text{SR}_2)]$	$\text{THI} = 0,8 \times T + (\text{RH}/100) \times (T - 14,4) + 46,4$
Black Globe-Humidity Index (Rind)	<b>BGHI</b>	Buffington et al., 1981	$T_{\text{bg}} + 0,36 \times T_{\text{dp}} + 41,5$	
Heat Load Index (Rind)	$\text{HLI}_{T_{\text{bg}} < 25}$	Gaughan et al., 2008	$10,66 + (0,28 \times \text{RH}) + (1,3 \times T_{\text{bg}}) - V$	e= Basis des natürlichen Logarithmus (ungefährer Wert von e = 2,71828)
	$\text{HLI}_{T_{\text{bg}} > 25}$		$8,62 + (0,38 \times \text{RH}) + (1,55 \times T_{\text{bg}}) \cdot (0,5 \times V) + [e^{2,4 \cdot V}]$	
Discomfort Index (Humanbereich)	<b>DI</b>	Nach Thom, 1959	$0,4 \times [1,8 T_{\text{db}} + 1,8 T_{\text{wb}} + 64] + 15$	Originalformel: $\text{DI} = 0,4 (T_{\text{db}} + T_{\text{wb}}) + 15$ mit $T_{\text{db}}$ und $T_{\text{wb}}$ in Fahrenheit
Environmental Stress Index (Humanbereich)	<b>ESI</b>	Moran et al., 2001	$0,63 T - 0,03 \text{RH} + 0,002 \text{SR}_1 + 0,0054 (T \times \text{RH})$	Skala von 0 (keine Belastung) bis 10 (sehr hohe Belastung)
			$- 0,073 (0,1 + \text{SR}_1)^{-1}$	
Physiological Strain Index (Humanbereich)	<b>PSI</b>	Moran et al., 1998	$5 (T_{\text{re}} - 2 T_{\text{re0}}) \times (39,5 - T_{\text{re0}})^{-1} +$	
			$5 (\text{HF} - \text{HF}_0) \times (180 - \text{HF}_0)^{-1}$	

HF= Herzfrequenz,  $\text{HF}_0$ =Herzfrequenz zu Versuchsbeginn, RH= relative Luftfeuchtigkeit (%),  $\text{SR}_1$ = Solarstrahlung ( $\text{Wxm}^{-1}$ ),  $\text{SR}_2$ = Solarstrahlung ( $\text{Wxm}^{-2}$ ), T= Lufttemperatur (°C),  $T_{\text{bg}}$ = „black globe“ Temperatur (°C),  $T_{\text{db}}$ = „dry bulb“ Temperatur (°C),  $T_{\text{wb}}$ = „wet bulb“ Temperatur (°C),  $T_{\text{dp}}$ = Taupunkt-Temperatur,  $T_{\text{re}}$ = Rektaltemperatur,  $T_{\text{re0}}$ = Rektaltemperatur zu Versuchsbeginn, V= Windgeschwindigkeit (m/s)

**Tabelle 2: Mögliche Hitzestress-Indikatoren**

Parameter	Quelle										
	Miescke et al., 1978/79	Zähler et al., 2004	Cincović et al., 2010	Wheellock et al., 2010	Shehab-El-Deen et al., 2010	Nabenishi et al., 2011	Pusta et al., 2011	Vujanac et al., 2011	Cincović et al., 2011	Calegari et al., 2012	Brügemann et al., 2012
Land der Studie	D	CH	Serbien	USA	Ägypten	Japan	Rumänien	Serbien	Kroatien	Italien	D
THI Formel		Ha97	Sh10	n.a.	Mc79/TH59	Ga07	Dr82	n.a.	Mc79	n.a.	Nr71/No79
Windgeschwindigkeit										X	
Solarstrahlung							X				
Hauttemperatur	X	X									
Vaginaltemperatur	X					X					
Rektaltemperatur		X		X	X	X	X			X	
Herzfrequenz	X	X									
Atemfrequenz	X			X	X				X	X	
Blutparameter				X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>			X <sub>3</sub>			
Steh-/Liegeverhalten	X	X							X	X	
Wasseraufnahme	X										
Trinkhäufigkeit	X										
Milchmenge	X		X	X			X		X		X
Laktationskurve			X								
Milchfett	X		X	X			X		X	X	X
Milchprotein	X		X	X			X		X	X	X
Somatische Zellzahl							X		X	X	X
Kortisol in Milch		X									
Laktosegehalt							X			X	
Futeraufnahme	X			X					X		
Körpergewicht	X			X							
Fruchtbarkeit					X				X		

Dr82 = Drăghici, 1982; Ga07 = Garcia-Isperto et al., 2007; Ha97 = Hahn und Mader, 1997; Mc79 = McDowell et al.1979; No79 = NOAA, 1979; Nr71 = NRC, 1971; Sh10 = Shehab-El-Deen et al., 2010; Th59 = Thom, 1959; n.a.: nicht angegeben; X<sub>1</sub>: Plasma Urea Nitrogen (PNU), Glucose, Insulin, freie unveresterte Fettsäuren (NEFA); X<sub>2</sub>: Glucose, NEFA, Cholesterin, Harnstoff; X<sub>3</sub>: pH, Glucose

## 2.2 Literaturübersicht

MIESCKE ET AL. (1978/79) kamen in ihrem Versuch zu dem Ergebnis, dass es keinen einzelnen Faktor gibt, der als alleiniger Indikator für Hitzestress brauchbar ist. Parameter, die in deren Studie erfasst wurden waren die Milchmenge, Fett- und Eiweißgehalt der Milch, Futtermenge, Wasseraufnahme, Trinkhäufigkeit, Liege- und Stehzeiten, Körpertemperatur (vaginal), Hauttemperatur, Atemfrequenz (als Impedanzmessung), Herzfrequenz (EKG-Ableitung) und Körpergewicht. Weitere Ergebnisse dieser Studie zeigten, dass keine Zuordnung der Wasseraufnahme zur Milchleistung und Futtermenge möglich war. Allerdings konnte gezeigt werden, dass es zu einem Abfall der Futtermenge 2 Tage vor dem Abfall der Milchleistung bei erhöhter Lufttemperatur kommt. Es konnte eine positive Korrelation ( $r=0,6$ ) zwischen der Herzfrequenz und der Milchmenge hergestellt werden. Außerdem stiegen die Hauttemperatur, Körpertemperatur, Atemfrequenz und Herzfrequenz an, blieben aber ca. nach einer Woche normalisiert auf höherem Niveau.

In einer weiteren Untersuchung von ZÄHNER ET AL. (2004) konnte gezeigt werden, dass der THI positiv mit der Körperoberflächentemperatur am Metatarsus (Steigung=0,462; Regressionskoeffizient=0,933), Oberschenkel (Steigung= 0,365; Regressionskoeffizient=0,931) und Euter (Steigung=0,218; Regressionskoeffizient=0,913) korreliert ist ( $P<0,001$ ). Zudem stiegen die Rektaltemperatur und Kortisolkonzentration während der Messungen um 17 Uhr (im Gegensatz zu den Messungen um 8 Uhr) mit steigendem THI signifikant an ( $P<0,001$ ). Die Parameter, die von ZÄHNER ET AL. (2004) untersucht wurden waren Luftfeuchte, Umgebungslufttemperatur, Körperoberflächentemperatur, Hauttemperatur, Rektaltemperatur, Kortisolkonzentration (in Milchproben), Herzfrequenz und Liegeverhalten. Ein wichtiges Ergebnis dieser Untersuchungen war, dass die Herzfrequenz und Frequenz des Liegeverhaltens nicht vom THI beeinflusst werden, sondern vom Aktivitätslevel der Kühe und der Betriebsroutine und dass sich signifikante Unterschiede zwischen dem THI und den Betrieben ( $P<0,05$  im Winter und Frühling) zeigen ließen. Ein wahrscheinlicher Grund hierfür kann der Einfluss der verschiedenen Haltungsbedingungen (verschiedene Ställe) sein. Dies wurde nicht erfasst und resultierte in unterschiedlichen THI-Kortisol- und THI-Rektaltemperatur-Verhältnissen.

In einer Untersuchung in Serbien wurden Parameter erfasst wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Milchmenge (Laktationskurve), Fettgehalt und Proteingehalt der Milch (CINCOVIĆ ET AL., 2010). Ein wesentliches Ergebnis dieser Studie war, dass moderater Hitzestress (THI zwischen 72 und 82) keinen Einfluss auf die Milchmenge, die Laktationskurve oder auf den Fett- und Proteingehalt der Milch einer gesamten Laktation hat. Während es keine Korrelation zwischen dem THI und der Milchproduktion im ersten Drittel der Laktation gibt, gibt es eine signifikante ( $p<0,01$ ) negative Korrelation (-0,466 und -0,570) zwischen dem THI und der Milchmenge im 2. und 3. Drittel der Laktation.

Das Wasseraufnahmeverhalten von grasenden Kühen wurde von PEREYRA ET AL. (2010) untersucht. Hierbei konnte ein Zusammenhang zwischen THI und Wasseraufnahme (bei THI-Anstieg steigt Anzahl der Trinkvorgänge/Tier und die Anzahl saufender Kühe) gezeigt werden. Es wurde aber auch festgestellt, dass ab einem THI>82 die Anzahl der Trinkvorgänge sinkt. Im Gegensatz zu CINCOVIĆ ET AL. (2010) kamen WHEELock ET AL. (2010) zu dem Ergebnis, dass sich die Milchmenge unter Hitzestress reduziert. Des Weiteren erhöhte sich der Grundumsatz und es zeigten sich eine sinkende Fettmobilisation und ein Anstieg in der Glucosenutzung.

Ein THI>80 (11 Uhr bis 19 Uhr) kann zu einer geringen Energieumsetzung führen und somit zu einer niedrigen Glucosekonzentration im Blut (SHEHAB-EL-DEEN ET AL., 2010). Alle Kühe dieser Untersuchung hatten signifikant ( $P<0,05$ ) höhere Atemfrequenzen und Rektaltemperaturen bei höheren THI-Werten. Es zeigte sich, dass der THI den höchsten Wert um 15 Uhr annimmt; dann steigt auch die Konzentration der veresterten Fettsäuren an. Glucose und nicht veresterte Fettsäuren sind dabei negativ korreliert ( $r=-0,50$ ;  $P<0,001$ ), sodass die Glucosekonzentration um 15 Uhr ihren Tiefpunkt hat. Um 15 Uhr wurden auch die niedrigsten Konzentrationen an Harnstoff und Gesamtcholesterin im Blut analysiert, jedoch die höchsten Rektaltempe-

raturen gemessen. Insgesamt zeigten die Parameter einen circadianen Rhythmus und die Autoren vermuten zudem eine Beeinflussung der Mikroumgebung der Oozyten.

Bei einem  $THI > 72$  zeigte sich in der Studie von CINCOVIĆ ET AL. (2011), dass signifikante Effekte auf die Futteraufnahme, die Milchproduktion und die Fruchtbarkeit, sowie Verhaltensänderungen zu beobachten sind. Es konnte gezeigt werden, dass es keine Korrelation zwischen der Milchqualität (Protein- und Fettgehalt) und dem THI gibt, wohingegen alle übrigen Parameter außer der Milchqualität als Indikatoren für die Hitzebelastung in der Praxis verwendet werden können. Folgende Parameter wurden von den Autoren in der Studie erfasst: Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Futteraufnahme (Punktzahl für Menge die aufgenommen ist im Vergleich zu dem was übrig bleibt), Verhaltensänderung (Prozentzahl der Kühe, die stehen oder liegen, Ansammlungen um Stallöffnungen), Atemfrequenz, Milchproduktion (Menge, Qualität) und Fruchtbarkeit.

Auch in der Studie von NABENISHI ET AL. (2011) konnte gezeigt werden, dass bei einem  $THI > 72$  eine niedrigere Konzeptionsrate zu beobachten ist. In dieser Studie wurden Parameter wie relative Luftfeuchte, Lufttemperatur, Vaginal-, Körperkerntemperatur und die Konzeptionsrate untersucht mit dem Ergebnis, dass eine Lufttemperatur  $> 30$  °C die Konzeptionsrate beeinflussen kann, nicht aber die Milchleistung.

Im Widerspruch zu der Studie von CINCOVIĆ ET AL. (2010) stellten PUSTA ET AL. (2011) eine sinkende Milchproduktion bei steigendem THI fest. Sie beschrieben einen direkten Zusammenhang zwischen einem erhöhtem THI ( $> 72$ ) und der erhöhten Zellzahl sowie zwischen dem erhöhten THI und dem erniedrigten Eiweiß- und Fettgehalt. Die folgenden Parameter wurden in der Studie von PUSTA ET AL. (2011) erfasst: Milchproduktion (Menge, Qualität: Leitfähigkeit, Eiweiß, Laktose, Fettgehalt und Zellzahl), relative Luftfeuchte, Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung und Rektaltemperatur.

VUJANAC ET AL. (2011) haben den THI und verschiedene Blutparameter (Glucose, pH-Wert) bestimmt und konnten feststellen, dass die Glucosekonzentration am Tag 90 der Laktation niedriger ist als am Tag 30 bzw. 60 und dass die Konzentration am Tag 90 im Sommer signifikant niedriger ist als die Konzentration am Tag 90 im Frühling.

Während der Studie von CALEGARI ET AL. (2012), in der die Verwendung von Sandeinstreu und Stroheinstreu bei italienischen Kühen verglichen wurde, wurden auch weitere Parameter erfasst wie die Lufttemperatur, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit, Milchhaltsstoffe (Fett-, Protein-, Lactosegehalt, Zellzahl), Rektaltemperatur, Atemfrequenz (optisch), Steh- und Liegeverhalten (Video) und im Außenpaddock verbrachte Zeit. Es stand allerdings der Vergleich der beiden Einstreuvarianten im Vordergrund, und dessen Fazit war, dass Sandeinstreu im Vergleich zu Stroh eine bessere Hitzestress-Reduktion bewirkt hat. Auf Sandeinstreu war die Atemfrequenz der Tiere signifikant geringer und die Ruhezeiten länger als bei der Verwendung von Stroheinstreu. Fett- und Proteingehalt waren während der Untersuchung im normalen Bereich und unterschieden sich nicht bei der Verwendung der zwei Einstreuarten. Die Zellzahl ist in den heißen Perioden (THI war maximal 78,2 bei Sand- und 81,5 bei Stroheinstreu) bei beiden Einstreuarten angestiegen, allerdings nicht signifikant. In beiden Varianten erfolgte eine zusätzliche Kühlung durch Ventilatoren und Sprinkler, was zu einer Verbesserung des Kuhkomforts geführt hat.

In einer deutschen Studie von BRÜGEMANN ET AL. (2012) wurden der Somatische Zell Score, der THI, die Milchmenge sowie Eiweiß- und Fettgehalt ermittelt. Ein Resultat dieser Studie war ein substantieller Rückgang der Milchmenge bei einem  $THI > 60$  (Mittelwert des stündlichen THI, Formel von BOHMANOVA ET AL., 2005, basierend auf einer Formel nach NRC, 1971) während des Zeitraums 11 bis 20 Wochen nach der Kalbung. Daraufhin definierten sie einen THI von 60 (entsprach einer Lufttemperatur von 16 °C) als den oberen Grenzwert der thermoneutralen Zone. Sie fanden zudem einen stetigen Abfall des Fett- und Proteingehaltes in der Milch bei zunehmendem THI. Es konnte allerdings kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem THI und der Zellzahl festgestellt werden und eine Erhöhung der Zellzahl zeigten nur die Kühe einer maritimen Region Deutschlands. In dieser Studie wurde noch eine weitere THI-Formel verwendet, für die die maximale Tagestemperatur und minimalste relative Luftfeuchtigkeit des Tages

verwendet wird (Formel von RAVAGNOLO UND MISZTAL, 2000, basierend auf einer Formel nach NOAA, 1979). Für diesen THI konnten Sie einen Grenzwert von 70 für Hitzestress definieren und ähnliche Reaktionen der Milchmenge und Milchinhaltsstoffe wie bei dem zuvor beschriebenen THI.

## 2.3 Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es zwar bereits vereinzelt Studien gibt, die neben dem THI auch bereits tierbezogene Parameter verwendet haben, dass es aber in keiner der Studien einen Nachweis gibt, ab wann man bei diesen Indikatoren von Stress sprechen kann und ob tatsächlich Stress bei den Tieren vorlag. Zudem ist die Vergleichbarkeit der verschiedenen Untersuchungen schwierig, da verschiedene THI-Formeln verwendet wurden und zum Teil auch der Nachweis der verwendeten Formel fehlte.

Daher sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, um zunächst die tierbezogenen Indikatoren genauer zu validieren und Grenzwerte für Hitzestress-Situationen definieren zu können.

## 2.4 Literatur

- BIANCA, W. (1976): The significance of meteorology in animal production. *Int. J. Biometeor.* 20 (2), 139-156
- BOHMANOVA, J.; MISZTAL I.; TSURUTA, S.; NORMAN, H.D.; LAWLOR, T.J. (2005): National genetic evaluation of milk yield for heat tolerance of United States Holsteins. *Interbull Bull* 33, 160-162
- BRÜGEMANN K.; GERNAND E.; KÖNIG VON BORSTEL, U.; KÖNIG, S. (2012): Defining and evaluating heat stress thresholds in different dairy cow production systems. *Archives of Animal Breeding* 55 (1), 13-24
- BUFFINGTON, D.E.; COLLAZOARROCHO, A.; CANTON, G.H.; PITT, D.; THATCHER, W.W.; COLLIER, R.J. (1981): Black Globe-Humidity Index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. *Transactions of the ASAE* 24, 711-714
- CALEGARI, F.; CALAMARI, L.; FRAZZI E. (2012): Misting and fan cooling of the rest area in a dairy barn. *Int. J. Biometeor* 56 (2), 287-295
- CINCOVIĆ M.R.; BELIĆ B.M.; TOHOLJ B.D.; RADOVIĆ, I.V.; VIDOVIĆ, B.R. (2010): The influence of THI values at different periods of lactation on milk quality and characteristics of lactation curve. *Journal of Agricultural Sciences* 55 (3), 235-241
- CINCOVIĆ M.; BELIĆ B.; TOHOLJ B.; STEVANČEVIĆ, M. (2011): On-farm measurement of heat stress load in dairy cows. Conference: 12th Middle European Buiatric Congress, Pula, Croatia, 18-22 May 2011. *Veterinarska Stanica* 42 (Supplement 1), 285-289
- DLG (2005): Vermeidung von Wärmebelastungen für Milchkühe. *DLG-Merkblatt* 336, Frankfurt
- DRĂGHICI, C. (1982): *Influența factorilor atmosferici asupra animalelor domestic*, editura ceres, bucurești. Nach Pusta et al. (2011)
- GARCIA-ISPIERTO, I.; LOPEZ-GATIUS, F.; BECH-SABAT, G.; SANTOLARIA, P.; YANIZ, J.; NOGAREDA, C.; DE RENSIS, F.; LOPEZ-BEJAR, M. (2007): Climate factors affecting conception rate of high producing dairy cows in northeastern Spain. *Theriogenology* 67 (8), 1379-1385
- GAUGHAN, J.B.; MADER, T.L.; HOLT, S.M.; LISLE, A. (2008): A new heat load index for feedlot cattle. *J Anim Sci* 86, 226-234
- HAHN, G.L.; MADER, T.L. (1997): Heat waves in relation to thermoregulation, feeding behaviour and mortality of feedlot cattle. In: Bottcher, R.W.; Hoff, S.J. (eds.): *Proceedings, Fifth International Symposium, Bloomington, Minnesota, USA, ASAE, St Joseph, MI. 29-31 May, 1997*

- MADER, T.L.; DAVIS, M.S.; BROWN-BRANDL, T. (2006): Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 84, 712-719
- DLG (2005): Vermeidung von Wärmebelastungen für Milchkühe. DLG-Merkblatt 336, Frankfurt
- MAHLKOW-NERGE (2007): Kühe fürchten Hitze. *Nutztierpraxis aktuell* 21, 4-10
- MCDOWELL, D.; HOOVEN, N.; CAMERON, K. (1979): Effects of climate on performance of Holsteins in first lactation. *J. Dairy Sci* 68, 2418-2435
- MIESCKE, B.; JOHNSON, E.H.; WENIGER, J.H.; STEINHAUF, D. (1978/79): Der Einfluss von Wärmebelastung auf Thermoregulation und Leistung laktierender Kühe, *Z. Tierzüchtg. Züchtgsbiol.* 95, 259-268
- MORAN, D.S.; PANDOLF, K.B.; SHAPIRO, Y.; HELED, Y.; SHANI, Y.; MATHEW, W.T.; GONZALEZ, R.R. (2001): An environmental stress index (ESI) as a substitute for the wet bulb globe temperature (WBGT). *Journal of Thermal Biology* 26, 427-431
- MORAN, D.S.; SHITZER, A.; PANDOLF, K.B. (1998): A physiological strain index to evaluate heat stress. *American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology* 275, R129-R134
- NABENISHI, H.; OHTA, H.; NISHIMOTO, T.; MORITA, T.; ASHIZAWA, K.; TSUZUKI, Y. (2011): Effect of the Temperature-Humidity Index on body temperature and conception rate of lactating dairy cows in Southwestern Japan. *Journal of Reproduction and Development* 57 (4), 450-456
- NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration (1997): Livestock hot weather stress. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service Central Region, Regional Operations Manual letter C-31-76, Kansas City, MO, USA
- NRC, National Research Council (1971): A guide to environmental research on animals. National Academy of Sciences, Washington, USA
- PEREYRA, A.V.G.; MAY V.M.; CATRACCHIA, C.G.; HERRERO, M.A.; FLORES, M.C.; MAZZINI, M. (2010): Influence of water temperature and heat stress on drinking water intake in dairy cows. *Chilean Journal of Agricultural Research* 70 (2), 328-336
- PUSTA D.; PAŞCA I.; SOBOLU R. (2011): The influence of the environment on milks' quantity and quality. *International Journal of Agriculture: Research and Review* 1 (4), 147-150
- RAVAGNOLO, O.; MISZTAL, I. (2000): Genetic component of heat stress in dairy cattle, development of heat index function. *J. Dairy Sci* 83, 2120-2125
- SHEHAB-EL-DEEN, M.A.M.M.; FADEL, M.S.; VAN SOOM A.; SALEH, S.Y.; MAES, D.; LEROY, J.L.M.R. (2010): Circadian rhythm of metabolic changes associated with summer heat stress in high-producing dairy cattle. *Tropical Animal Health and Production* 42 (6), 1119-1125
- THOM, E.C. (1959): The discomfort index. *Weatherwise* 12, 57-60
- VUJANAC, I.; KIROVSKI, D.; SAMANC, H.; PRODANOVIC, R.; ADAMOVIC, M.; IGNJATOVIC, M. (2011): Glucose concentration and blood acid-basis status in high-yielding dairy cows during heat stress. *Veterinarski Glasnik* 65 (5/6), 297-312
- WALTER, K.; LÖPMEIER, F.-J. (2010): Fütterung und Haltung von Hochleistungskühen: 5. Hochleistungskühe und Klimawandel. *Landbauforschung-vTI Agriculture and Forestry Research* 60 (1), 17-34
- WEST, J.W. (2003): Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 86, 2131-2144

- WHEELLOCK J.B.; RHOADS R.P.; VANBAALE M.J.; SANDERS S.R.; BAUMGARD L.H. (2010): Effects of heat stress on energetic metabolism in lactating Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 93 (2), 644-655
- ZÄHNER, M.; SCHRADER, L.; HAUSER, R.; KECK, M.; LANGHANS, W.; WECHSLER, B. (2004): The influence of climatic conditions on physiological and behavioural parameters in dairy cows kept in open stables. *Animal Science* 78, 139-147

### **3 Untersuchungen zur Herzfrequenzvariabilität von Milchkühen bei verschiedenen Umgebungstemperaturen**

*O. Tober, C. Loebstin, G. Hoffmann*

#### **3.1 Einleitung und Zielstellung**

Unsere modernen Milchviehrassen weisen in den letzten Jahren eine stetig gestiegene Leistung auf. Das bedeutet, dass die Tiere bei hohen Umgebungstemperaturen zunehmend häufiger unter Stress geraten. Der leistungsbedingt erhöhte Stoffwechsel führt zu großen Mengen überschüssiger Wärme, die in ausreichendem Maße an die Umgebung abgegeben werden muss. Gelingt dies nicht, kommt es zu Wärmebelastungen oder Hitzestress. Dem können die Tiere einerseits durch eigene Mechanismen der Thermoregulation begegnen und andererseits ist durch gezielte Veränderungen der Haltungsumwelt eine Einflussnahme auf diese Thermoregulation möglich.

Mit den hier vorgestellten Untersuchungen zur Herzfrequenzvariabilität bei Milchkühen sollen Aussagen zur Belastung der Tiere durch hohe oder niedrige Stalllufttemperaturen, wie sie im Jahresverlauf in einem freigelüfteten Laufstall auftreten, gemacht werden. Untersuchungen zum Verhalten von Milchkühen aus der Vergangenheit zeigen, dass die Tiere mit deutlichen Verhaltensänderungen auf unterschiedliche Temperaturen reagieren. Allerdings gibt es kaum Anhaltspunkte nach denen aus der Intensität der Verhaltensanpassung auf die Intensität der Belastung geschlossen werden könnte (TOBER ET AL., 2012, TOBER UND LOEBSIN, 2013). Der Versuch einer Näherung soll deshalb hier mit Hilfe von Untersuchungen der HRV erreicht werden.

#### **3.2 Literaturbetrachtung**

Eine gute, nichtinvasive Möglichkeit, Belastungen sowohl qualitativ als auch quantitativ nachzuweisen, stellt die Messung von verschiedenen Parametern der Herzfrequenzvariabilität, auch als Herzratenvariabilität (HRV) bezeichnet, dar. Ursprünglich stammt diese Methode aus der Humanmedizin, findet aber in den letzten 10 bis 15 Jahren zunehmend auch in der Tierforschung Anwendung, um Veränderungen in der sympathovagalen Balance in Verbindung mit Krankheiten, Stressoren oder individuellen Merkmalen wie Temperament und Copingstrategien zu analysieren (BORELL ET AL., 2007). So konnten MOHR ET AL. (2002) durch die erfolgreiche Untersuchung von Belastungszuständen bei Milchrindern und Kälbern mit Hilfe verschiedener Parameter der HRV-Analyse die prinzipielle Anwendbarkeit dieser Methode auch bei Rindern nachweisen.

Trotz einer gewissen Zunahme der HRV-Untersuchungen bei Nutztieren sind nur vereinzelt Angaben im Schrifttum zu finden und speziell an Milchrindern sind derartige Untersuchungen bislang nur in sehr geringem Umfang vorhanden (MOHR ET AL., 2002; BORELL ET AL., 2007; KOVÁCS ET AL., 2014). Erst in jüngerer Vergangenheit sind auf diesem Gebiet einige wenige Arbeiten hinzugekommen (GYGAX ET AL., 2008; KONOLD ET AL., 2011; KOVÁCS ET AL., 2013A UND 2013B).

HOTTENROTT (2002) beschrieb die HRV als eine Messgröße der neurovegetativen Aktivität und autonomen Funktion des Herzens sowie dessen Fähigkeit, den zeitlichen Abstand von Herzschlag zu Herzschlag belastungsabhängig laufend zu verändern, um sich wechselnden Anforderungen schnell anzupassen. Die HRV ist somit eine Kenngröße für die Anpassungsfähigkeit des Organismus an innere und äußere Belastungsfaktoren, welche nichtinvasiv und relativ einfach auch unter landwirtschaftlichen Praxisbedingungen erfasst werden kann. Die Entwicklung kleiner relativ leicht handhabbarer Messsysteme zur Erfassung von Pulscurven im Sportbereich hat in den letzten Jahren einen Stand erreicht, der diese Geräte zu erschwinglichen Preisen problemlos verfügbare und anwendbar macht.

Steigen die Anforderungen an den Organismus, so vermindert sich die HRV. Diese Anpassung wird durch den Sympathikus mit Wirkung auf den Sinusknoten hervorgerufen. Dagegen bewirkt der Parasympathikus im Zustand von Ruhe, Entlastung und Entspannung eine Erhöhung der HRV. Mit Hilfe statistischer, frequenzanalytischer und nichtlinearer Kenngrößen, die aus den Datenreihen der einzelnen Zeitabstände zwischen den Herzschlägen (RR-Intervalle) berechnet werden, lässt sich die HRV beschreiben und die sympathovagale Balance bewerten. Die HRV stellt somit ein Maß der autonomen Funktion des Herzens dar, also der Einflüsse des sympathischen und parasympathischen Nervensystems. Ein ausgeglichenes Verhältnis beider Teile des autonomen Nervensystems wird sympathovagale Balance genannt (LÖLLGEN, 1999).

Eine der frühesten Arbeiten zur Erprobung und Bewertung von Parametern der HRV als neuer Ansatz zur Belastungsbeurteilung bei Milchkühen stammt von MOHR ET AL. (2002). Dabei wurden Untersuchungen sowohl an Kälbern als auch an Milchkühen bei unterschiedlichen Belastungszuständen durchgeführt. Zur Stressbewertung sind HRV-Parameter aus dem Zeit- und Frequenz- sowie dem nichtlinearen Bereich analysiert worden. Bei den Milchkühen stellten die Autoren vergleichende Untersuchungen zwischen laktierenden und nicht laktierenden Tieren an. Zwischen beiden Gruppen wurden bei den nichtlinearen Parametern (Zeit- und Frequenzbereich) keine Unterschiede gefunden. Die nichtlinearen Parameter wiesen jedoch bei den laktierenden Tieren signifikant höhere Werte auf als bei den trockenstehenden, woraus auf eine Verschiebung der sympathovagalen Balance in Richtung Sympathikus geschlossen wurde und damit auf eine höhere Belastung. Resümierend stellten MOHR ET AL. (2002) fest, dass die nichtlinearen Parameter bei Kälbern und Kühen am besten geeignet waren, das Stresslevel zu kennzeichnen und dass die HRV ein guter physiologischer Indikator ist, um die Stressbelastung von Tieren zu kennzeichnen. Dabei wurden die linearen Parameter der HRV als geeignet für die Bewertung qualitativ unterschiedlicher Belastungen herausgestellt und die nichtlinearen Parameter als geeignet für die quantitative Bewertung von Stresslevels.

HAGEN ET AL. haben 2005 vergleichende HRV-Analysen an Milchkühen der Rassen Österreichisches Fleckvieh und Schweizer Braunvieh durchgeführt. Außerdem wurden beide Rassen in einem Automatischen Melksystem (AMS) mit teilweise gelenktem Kuhverkehr und in einem Fischgrätenmelkstand untersucht. Zusätzlich fanden die Einflussfaktoren Tageszeit der jeweiligen Messung und Lebendmasse, Milchleistung, Laktationsstadium sowie Trächtigkeitsstadium der untersuchten Tiere Eingang in die Auswertung. Die Ergebnisse zeigten eine Zunahme der Herzfrequenz und der HRV mit fortschreitender Tageszeit und mit zunehmender Lebendmasse. Beim Vergleich der Rassen wurden beim Schweizer Braunvieh in den zeitbezogenen HRV-Parametern höhere und bei den nichtlinearen Parametern niedrigere Werte gefunden als beim Österreichische Fleckvieh. Unterschiede bei einigen Parametern zwischen den Melksystemen, die während des Liegens erfasst wurden, deuteten auf chronischen Stress im AMS mit teilweise gelenktem Kuhverkehr hin. Da aber keine Unterschiede beim Melken gefunden wurden, schlussfolgerten die Autoren, dass nicht der Melkprozess selbst der Stressauslöser sein kann.

Mit dem Problem der Belastungsintensität von Milchkühen in verschiedenen Melksystemen beschäftigten sich auch GYGAX ET AL. (2008). Sie führten einen Vergleich durch, indem sowohl Verhaltensmerkmale als auch Herzschlagrate (HR) und ein HRV-Parameter untersucht wurden. In die Studie waren 12 Betriebe mit drei verschiedenen Melktechnologien einbezogen. Bei den Melksystemen handelte es sich um zwei verschiedene Automatische Melksysteme (AMS) der Firmen Lely und DeLaval sowie Auto-Tandem-Melkstände (ATM). Das sogenannte Unruheverhalten (Trippeln, Fußheben und nach dem Melkzeug treten) wurde im AMS-2 (DeLaval) häufiger gezeigt als im AMS-1 (Lely) oder im ATM. Die HR war in allen Systemen beim Melken höher als beim Ruhen. Dieser Anstieg war im AMS-2 (DeLaval) am größten. In beiden AMS-Systemen war die HR sowohl während des Ruhens als auch während des Melkens höher als im ATM. Beim HRV-Parameter RMSSD (Variabilität der jeweils aufeinanderfolgenden RR-Intervalle) wurde in allen Systemen eine Verringerung vom Ruhen zum Melken gemessen. Dabei war die Differenz im AMS-1 (Lely) geringer. Die geringsten RMSSD-Werte während des Melkens wurden im AMS-2 (DeLaval) gefunden. Insgesamt wurde aus den Messergebnissen geschlussfolgert, dass in den beiden AMS verglichen mit dem ATM die Kühe einem leicht erhöhten Stresslevel ausgesetzt sind. Allerdings waren die Unterschiede zu marginal, um von einer ernsthaften Beeinträchtigung des Wohlbefindens sprechen zu können.

Messungen der HRV zur Bestimmung der Belastung der Kühe während des Melkprozesses in einem Parallelmelkstand haben KOVACS ET AL. (2013a) durchgeführt. Dabei wurden die HR und die mittels Poincaré-Plot ermittelten geometrischen Parameter SD1 (Kurzzeitvariabilität, Beurteilung der parasympathischen Aktivität) und SD2 (Langzeitvariabilität, Beurteilung der Sympathikusaktivität) bestimmt. Die Messungen wurden während verschiedener Abschnitte des Melkprozesses (Treiben, Wartebucht, Eutervorbereitung, Melken, Warten im Melkstand nach Melkende) durchgeführt und mit einer Referenzmessung (Ruhe) verglichen. Die SD1 war während der Referenzperiode signifikant höher als an jedem anderen Messzeitpunkt, weshalb auf einen hohen Vagustonus geschlossen wurde. Die HR wurde signifikant vom Melkabschnitt, vom Vaterbullen und von der Milchleistung beeinflusst, SD1 vom Melkabschnitt und vom Vaterbullen und SD2 von der Laktationsnummer (erste Laktation oder höher), vom Melkabschnitt, vom Vaterbullen und von der Milchleistung. Es wurde geschlussfolgert, dass keine tierschutzrelevanten Unterschiede zwischen der Referenzperiode und den einzelnen Melkabschnitten gefunden wurden und dass das konventionelle Melken kein Problem für die Kühe darstellt. Die SD2 wurde als Parameter herausgestellt, der von verschiedenen unabhängigen Faktoren wie Vaterbulle, Laktationsnummer und Milchleistung beeinflusst war.

In einer weiteren Quelle berichteten KOVACS ET AL. (2013b) ebenfalls von Untersuchungen der HRV während des Melkens, wobei hier scheinbar von einem identischen Versuchsdesign berichtet wurde wie bei KOVACS ET AL. (2013a). Die untersuchten Parameter umfassten aber außer der HR, SD1 und SD2 noch die RMSSD sowie die Anteile niedriger Frequenzen (LF: 0,05-0,20 Hz) und hoher Frequenzen (HF: 0,20-0,58 Hz) am Gesamtfrequenzspektrum. Dabei wurde davon ausgegangen, dass der LF-Anteil sowohl parasympathisch als auch sympathisch beeinflusst ist und der HF-Anteil ausschließlich sympathische Komponenten widerspiegelt. Während verglichen mit den Referenzwerten in den Melkphasen Vorbereitung und Hauptmelken keine Unterschiede in den HRV-Parametern gefunden werden konnten, kam es zu einer erheblichen Reduzierung parasympathischer Aktivität während des Treibens zum Melkstand und im Wartebereich. Daraus wurde geschlussfolgert, dass der Melkvorgang selbst für die Tiere keine Belastung darstellte. Die verringerte parasympathische Aktivität während des Zutriebs zum Melkstand ist als Ergebnis der körperlichen Aktivität interpretiert worden. Dagegen wurde anhand der erhobenen Parameter das Warten im Wartebereich und auf dem Melkstand (vom Ende des Melkens bis Austrieb) als Stress verursachend identifiziert.

Den Versuch mittels HRV-Parametern BSE-positive und BSE-negative Rinder zu unterscheiden unternahm KONOLD ET AL. (2011). Dabei wurden Unterschiede bei der HR und beim vasovagalen Tonus-Index (natürlicher Logarithmus der Varianz der RR-Intervalle) sowie bei den Frequenzbereichsparametern LF, HF und deren Quotient zwischen männlichen und weiblichen Tieren gefunden jedoch nicht zwischen den infizierten oder nicht infizierten Gruppen. Mittels HRV-Analyse konnten BSE-positive und -negative Tiere nicht differenziert werden.

### **3.3 Tiere, Material und Methode**

Die Untersuchungen fanden in der Milchviehherde eines Betriebes in Mecklenburg-Vorpommern statt. Die Herde bestand aus rund 440 Tieren der Rasse Deutsche Holstein, die dreimal täglich gemolken wurden (Beginn der Melkzeiten: 06:00 Uhr, 14:00 Uhr und 22:00 Uhr). Während der Zeit der Datenaufnahme wurden hier durchschnittliche Milchleistungen von rund 10500 kg Milch pro Kuh und Jahr bei ca. 4 % Fett und 3,4 % Eiweiß erreicht.

Gehalten wurden die Tiere in einem Liegeboxenlaufstall mit Mistmatratzen in den Liegeboxen und planbefestigtem Gussasphaltfußboden auf den Laufflächen. Die Entmistung fand mit Hilfe eines automatischen Faltschiebers statt. Gefüttert wurde eine Totale Mischration (TMR), die mobil über einen Futtertisch verabreicht worden ist. Das Tier-Fressplatz-Verhältnis betrug dabei ca. 1,6 : 1. Im Stall waren drei Vertikallüfter (Durchmesser: 7,32 m) mittig über dem Futtertisch angebracht, welche an warmen Tagen zur Unterstützung der Thermoregulation der Kühe manuell angeschaltet wurden. Auch die Lüfterleistung wurde manuell über die Drehzahl festgelegt.

Im Stall befanden sich insgesamt vier Haltungsgruppen mit jeweils zweimal 118 Tierplätzen und zweimal 72 Tierplätzen. Die Haltungsgruppen stellten Fütterungsgruppen dar, in denen die Kü-

he nach Laktationsstadium und/oder Leistungsausprägung differenzierte Futterrationen erhielten. Weitere Gruppenbuchten (Kalbe- und Kollostralmilchbereich, Trockensteher, Kranke) befanden sich in anderen Stallgebäuden.

Zur Beschreibung der thermischen Bedingungen war über den gesamten Zeitraum ein Temperatur-Luftfeuchte-Logger (MSR 145) in der Stallmitte im Tierbereich in ca. 120 cm Höhe angebracht. Aufgezeichnet wurde in einem stündlichen Messintervall.

Aus der Milchviehherde wurden für die HRV-Untersuchungen insgesamt 20 Tiere nach folgenden Prämissen ausgewählt. Alle Tiere befanden sich in der zweiten Laktation, so konnte eine Beeinflussung der HRV durch Laktationsnummer und Alter weitgehend vermieden werden. Zehn Tiere kalbten zwischen dem 25. Mai und dem 16. Juni 2012. Damit konnte der Laktationstag als Einflussfaktor für diese Tiere relativ eng eingegrenzt werden. Weitere zehn Tiere kalbten zwischen dem 25. Februar und dem 25. März 2012 ab. Auch hier wurde versucht, den Zeitraum möglichst eng zu gestalten. Damit standen zwei Gruppen mit einer Differenz von etwa 80 bis 90 Laktationstagen für die Messungen zur Verfügung. Somit bestand die Möglichkeit, eventuelle Unterschiede zwischen den Laktationsabschnitten als systematischen Einfluss erfassen und bewerten zu können.

Für die Untersuchungen der HRV wurden die RR-Zeitabstände (Abstände zwischen zwei Herzschlägen) mit dem Gerätesystem Polar Equine der Firma Polar Electro Oy (Finnland) erfasst. Diese Geräte sind zur Trainingssteuerung im Pferdesport entwickelt wurden. Als kompatible Pulsuhr kam das Modell Polar RS 800 CX zum Einsatz. Um die Ableitungselektroden und Geräte funktionssicher über mehrere Stunden am freilaufenden Tier in der Herde anzubringen, wurden speziell angefertigte Gurte zur Aufnahme der Elektroden und des Senders verwendet (Abbildung 1, rechtes Bild) sowie ein Halsband, in dem die Pulsuhr als Empfänger und Datenlogger in einer sogenannten Otter-Box stoß- und feuchtigkeitssicher untergebracht war (Abbildung 1, linkes Bild). Insgesamt standen 10 solcher Systeme zur Verfügung.



**Abbildung 1: Befestigung des Herzfrequenzmesssystems am Tier**

Die Erfassung der Daten zur Herzfrequenz (heart rate, HR) wurde an drei Messzeitpunkten mit jeweils zwei Messtagen (20 Tiere mit 10 Gerätesystemen) durchgeführt. Die Messtage sind anhand der Umgebungstemperaturen festgelegt worden. Neben der Temperatur wurde auch die relative Luftfeuchte erfasst, um den Temperatur-Feuchte-Index (temperature humidity index, THI) nach MADER ET AL. (2006) für eine bessere Charakterisierung der Wärmebelastung berechnen zu können. In Tabelle 3 sind die realisierten Messungen und die zugehörigen Stallklimadaten aufgezeigt. Zu Beginn jeder Aufzeichnung wurde bei jedem teilnehmenden Tier die Rektaltemperatur mittels Digitalthermometer erfasst. Für die Aufzeichnung der RR-Daten wurde

den Tieren nach dem Morgenmelken vor Rückkehr in den Stall der Messgurt und das Halsband angelegt und nach dem nächsten Melken am Nachmittag wieder entfernt. Der Kontakt zwischen der Haut und den Messelektroden kann durch eine Rasur verbessert werden. In den vorliegenden Untersuchungen wurde sich jedoch bewusst dagegen entschieden, um eine Beeinflussung des Wohlbefindens und/oder der physiologischen Reaktionen der Kühe durch rasierte Hautpartien ausschließen zu können. Die Kontaktstellen wurden lediglich mit Wasser befeuchtet, damit eine elektrische Ableitung der Hautpotenziale möglich wurde. Der versuchsweise Einsatz von Elektrodengel statt Wasser im Vorfeld der Untersuchungen brachte keine erkennbare Verbesserung der Messqualität. Der Verzicht auf die Rasur hatte allerdings aufgrund schlechterer Leitfähigkeit ein erhöhtes Risiko von Messausfällen zur Folge. Insbesondere, wenn sich die Tiere während der Messungen hinlegten oder aufstanden, konnte es durch Verrutschen der Elektroden zu Kontaktproblemen und damit Messausfällen kommen. Dauerten solche Messausfälle zu lange an, beendete das Polarsystem die Aufzeichnung der laufenden Messung. Dieser Umstand und die Festlegung zur Messgüte der verwendeten RR-Datenreihen, dass eine Messreihe nicht mehr als 5 % Artefakte aufweisen durfte, führten zu einer Reihe von Ausfällen. Als Artefakt wurden Messwerte bezeichnet, bei denen aufeinanderfolgende RR-Intervalle in physiologisch nicht erklärablem Maß differierten (HOTTENROTT, 2012). Insgesamt standen sieben auswertbare Tiere mit Messergebnissen an allen drei Messzeitpunkten zur Verfügung und 16 Tiere mit auswertbaren Messreihen an den Messzeitpunkten Übergang und warm.

**Tabelle 3: Datum der Durchführung und Mittelwerte sowie Spannweiten der erfassten Stallklimadaten während der Messungen**

	kalt (Winter)	Übergang	warm (Sommer)
<b>Datum</b>	15./17.01.2013	06./07.11.2012	24./26.07.2012
<b>Stalltemperatur (°C)</b>	1,7 (-0,4 - 3,8)	9,0 (7,3 - 10,5)	26,8 (26,1 - 27,5)
<b>relative Luftfeuchte (%)</b>	87,8 (84,5 - 91,7)	82,8 (75,3 - 90,1)	45,9 (43,3 - 48,7)
<b>THI</b>	36,7 (33,0 - 40, 4)	49,1 (46,1 - 51,5)	73,5 (72,8 - 74,4)
<b>Anzahl auswertbare Tiere</b>	7	17	18

Für die Analyse der HRV wurde sich für fünfminütige Kurzzeitmessungen entschieden (TASK FORCE, 1996; HOTTENROTT, 2012). Es wurden Messreihen während einer Liegephase der Tiere verwendet, so dass es sich um Ruhemessungen handelte. Deshalb kamen nur Datenreihen zur Auswertung, bei deren Erfassung die Tiere bereits mindestens 15 Minuten gelegen hatten, um sicherzustellen, dass es sich um einen Ruhepuls handelte. Überprüft wurde dies anhand der Verhaltensparameter, welche mittels ALT-Pedometer aufgezeichnet wurden, das jede untersuchte Kuh trug. Außerdem musste die Kuh für eine verwendbare Messung den Messgurt schon mindestens 30 Minuten getragen haben, um eine Gewöhnung sicherzustellen. Jede analysierte Messreihe musste genau fünf Minuten auswertbare Länge aufweisen. Waren die genannten Bedingungen erfüllt, wurden die RR-Datenreihen auf Artefakte geprüft, deren Anteil fünf Prozent nicht überschreiten durfte. Hierfür wurden die RR-Datenreihen zunächst visuell überprüft und anschließend mit einem Tool untersucht, welches in der zum Polar-Gerätesystem gehörenden Software Polar ProTrainer 5™ Equine Edition implementiert ist. Mit demselben Programmtool wurde dann gegebenenfalls die Korrektur der RR-Messreihe vorgenommen. Dabei wurden folgende Filtereinstellungen verwendet:

- Filterleistung: moderat
- Minimale Schutzzone: 6 Schläge pro Minute
- Entfernen von Fehlerkorrekturen großer Ausschläge der Herzfrequenzdaten: nicht aktiviert

Die anschließende Analyse der Herzfrequenzvariabilität fand mithilfe des Programms Kubios HRV 2.0 (University Kuopio, Finnland) statt.

Als Frequenzbereiche für die Spektralanalyse wurden für die Milchrinder folgende Frequenzbänder in Anlehnung an MOHR ET AL. (2002) und BORELL ET AL. (2007) festgelegt:

VLF (very low frequency): 0,00 - 0,04 Hz

LF (low frequency): 0,04 - 0,15 Hz

HF (high frequency): 0,20 - 0,58 Hz

Der HF-Frequenzbereich entsteht durch mehrere Regelkreise, welche parasymphatische Anteile in der Steuerung der HRV wiedergeben. Den wohl bedeutendsten Einfluss auf den HF-Bereich haben dabei die Frequenzen der respiratorischen Sinusarrhythmie. Hierbei handelt es sich um die Schwankungen in der Herzfrequenz, die durch die Atmung des betreffenden Individuums entstehen. Dabei wurde in der vorliegenden Studie eine mittlere normale Atemfrequenz von 12 bis 35 pro Minute zugrunde gelegt (BORELL ET AL., 2007).

Der Frequenzbereich VLF wurde in den Auswertungen nicht weiter berücksichtigt, weil in den realisierten Kurzzeitmessungen von jeweils fünf Minuten diese Frequenzen nur wenig nachweisbar waren. Perioden mit 0,04 Hz als obere Grenze dieses Bereiches treten in fünf Minuten nur neunmal auf, geringere Frequenzen entsprechend noch seltener. Dieser Bereich ist daher für Kurzzeitanalysen nur sehr eingeschränkt nutzbar. Bei den Spektralanalysen der Messreihen ist die Autoregression verwendet worden. HOOS (2012) gibt der Autoregression vor der Fast Fourier-Analyse bei Kurzzeitmessungen den Vorzug. Dabei wurde ein Modell sechzehnter Ordnung ohne Faktorisierung verwendet (HOOS, 2012).

**Tabelle 4: Untersuchte Parameter der Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität**

Kurzzeichen	Maßeinheit	Definition	Interpretation
HR	n/min	mittlere Herzschlagrate einer Messreihe	allgemeine Kreislaufaktivität
RR	ms	mittlerer Abstand aller RR-Intervalle einer Messreihe	allgemeine Kreislaufaktivität
SDNN	ms	Standardabweichung aller RR-Intervalle einer Messreihe	Gesamtvariabilität, Langzeitvariabilität
RMSSD	ms	Quadratwurzel des Mittelwerts der quadrierten Differenzen sukzessiver RR-Intervalle	Aktivität des Parasympathikus
LF <sub>norm</sub>	norm. Einheit	normierte Leistung im LF-Band [LF / (Gesamtleistung – VLF-Leistung) * 100]	Mischung aus parasymphatischer und sympathischer Aktivität
HF <sub>norm</sub>	norm. Einheit	normierte Leistung im HF-Band [HF / (Gesamtleistung – VLF-Leistung) * 100]	Aktivität des Parasympathikus
LF/HF		Quotient aus den Leistungen in den LF- und HF-Frequenzbändern	sympathovagale Balance
SD1	ms	Streuung der Herzschläge im Poincaré-Diagramm, Querdurchmesser der Vertrauensellipse	Kurzzeitvariabilität der Herzfrequenz, Aktivität des Parasympathikus (in Ruhe)

In Tabelle 4 sind die untersuchten Parameter beschrieben. Die HR wurde aus den RR-Intervallen einer Messreihe berechnet ( $HR = 60.000 \text{ ms /RR}$ ). Allerdings liefert die HR gegenüber der RR keine neue Information. Dennoch wurden die Ergebnisse aus den gemessenen RR-Werten auch als HR-Werte dargestellt, da in der angewandten Nutztierforschung häufig noch die HR verwendet wird und es ein geläufiger Parameter ist.

## Statistik

Alle aufgeführten Parameter zur Charakterisierung der HRV wurden mit Hilfe der Software Kubios 2.0 ermittelt. Anschließend wurde aus diesen Daten eine Excel-Datei zur weiteren Datenbehandlung entwickelt. Die statistische Verrechnung der Ergebnisse erfolgte mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogrammes Excel 2010 inklusive des Add-In-Programms XLSTAT (Version 2012.1.01) und des Statistik-Programmpaketes SAS 9.3. Dabei wurde für die Ermittlung von Faktoreinflüssen ein gemischtes Modell mit fixen und zufälligen Einflussfaktoren verwendet. Für die Vergleiche zwischen adjustierten Mittelwerten kam der Tukey-Kramer-Test zum Einsatz. Mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Tests wurden die Merkmale bzw. deren Residuen auf Normalverteilung überprüft. Bei einer signifikanten Ablehnung der Normalverteilung durch diesen Test wurden die betroffenen Datenreihen einer logarithmischen Transformation unterzogen. Wurde dadurch eine Normalverteilung erreicht, ist das gemischte Modell mit den logarithmierten Werten gerechnet worden. Wurde auch nach der Transformation keine Normalverteilung erreicht, sind Mittelwertvergleiche mit dem parameterfreien Kruskal-Wallis-Test durchgeführt worden.

## 3.4 Ergebnisse

In Tabelle 5 und Tabelle 6 sind für jedes untersuchte Merkmal die verwendeten statistischen Modelle mit den Einflussfaktoren dargestellt. Dabei stehen nachfolgend aufgeführte Symbole für die jeweiligen Einflussfaktoren.

T = Temperatur/Messzeitpunkt      KM = Kalbemonat

M = Milchleistung      e = Restvarianz

Die Milchleistung ging als klassifizierter, zufälliger Effekt in jedes Modell ein. Anhand des AIC (Akaike Information Criterion) wurde entschieden, ob die Wechselwirkungen Temperatur/Messzeitpunkt\*Milchleistung und Kalbemonat\*Milchleistung in das Modell aufgenommen wurden oder nicht.

Bei den Auswertungen mit drei Messzeitpunkten (Tabelle 5) konnte für keinen Parameter ein signifikanter Einfluss der beiden fixen Effekte (Messzeitpunkt bzw. Kalbemonat) nachgewiesen werden. Die Analysen mit zwei Messzeitpunkten (Tabelle 6), die mit einer größeren Anzahl Tiere erfolgte, zeigten jedoch bei den Parametern  $LF_{\text{norm}}$ ,  $HF_{\text{norm}}$  und dem Quotienten  $LF/HF$  einen signifikanten Einfluss des Messzeitpunktes und damit der Umgebungstemperatur. Bei der Rektaltemperatur wurde ein Einfluss des Kalbemonats nachgewiesen. Allerdings konnte hierfür keine Erklärung gefunden werden. Zusätzlich muss hinzugefügt werden, dass die RMSSD und die SD1 in den Messreihen mit zwei Messzeitpunkten (Tabelle 6) auch nach einer logarithmischen oder exponentiellen Transformation keine Normalverteilung aufwiesen und deshalb keiner Varianzanalyse unterworfen wurden. Somit ist eine Aussage zum Einfluss der beiden Effekte bei diesen beiden Merkmalen nicht möglich. Bei den Messreihen mit zwei Messzeitpunkten waren die Ausgangswerte der Merkmale SDNN und  $LF/HF$  nicht normalverteilt. Die Bedingung der Normalverteilung konnte hier durch eine logarithmische Transformation erfüllt werden.

In Tabelle 7 und Tabelle 8 sind die adjustierten Mittelwerte der untersuchten Merkmale aufgezeigt, die mit Hilfe der gemischten Modelle berechnet wurden. Dabei zeigte sich, dass bei den Messreihen mit drei Messzeitpunkten bzw. drei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen (Tabelle 7), in die lediglich sieben Tiere involviert werden konnten, zwar scheinbar deutliche Tendenzen in den Abstufungen der Mittelwerte an den verschiedenen Messzeitpunkten gefunden wurden, jedoch in keinem Fall ein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden konnte. Dies ist mit großer Wahrscheinlichkeit der geringen Tieranzahl und der relativ großen Varianz

**Tabelle 5: Verwendete Modelle und Testergebnisse der fixen Effekte mit drei Messzeitpunkten (kalt, Übergang und warm), n= 7**

	verwendetes Modell	p-Wert der fixen Effekte	
		Temperatur/ Messzeitpunkt	Kalbbemonat
Rektaltemperatur	$Y = T + KM + M + e$	0,069	0,288
HR	$Y = T + KM + M + M*T + e$	0,133	0,143
RR	$Y = T + KM + M + M*T + e$	0,134	0,183
SDNN	$Y = T + KM + M + e$	0,618	0,573
RMSSD	$Y = T + KM + M + e$	0,285	0,288
LF <sub>norm</sub>	$Y = T + KM + M + e$	0,127	0,497
HF <sub>norm</sub>	$Y = T + KM + M + e$	0,127	0,497
LF/HF	$Y = T + KM + M + M*KM + e$	0,298	0,354
SD1	$Y = T + KM + M + e$	0,288	0,294

**Tabelle 6: Verwendete Modelle und Testergebnisse der fixen Effekte mit zwei Messzeitpunkten (Übergang und warm), n= 16**

	verwendetes Modell	p-Wert der fixen Effekte	
		Temperatur/ Messzeitpunkt	Kalbbemonat
Rektaltemperatur	$Y = T + KM + M + e$	0,626	<0,001
HR	$Y = T + KM + M + M*T + e$	0,189	0,065
RR	$Y = T + KM + M + M*T + e$	0,197	0,069
SDNN	$Y = T + KM + M + e$	0,695	0,183
RMSSD	Nicht normalverteilt, deshalb keine varianzanalytische Berechnung.		
LF <sub>norm</sub>	$Y = T + KM + M + e$	0,007	0,152
HF <sub>norm</sub>	$Y = T + KM + M + e$	0,007	0,152
LF/HF	$Y = T + KM + M + e$	0,004	0,084
SD1	Nicht normalverteilt, deshalb keine varianzanalytische Berechnung.		

geschuldet, denn bei Betrachtung der Ergebnisse in Tabelle 8, wo es sich um die Mittelwerte der Datenreihen aus 16 gemessenen Tieren handelt, wurden bei allen Merkmalen gleiche Tendenzen bei meistens sehr ähnlichen Größenordnungen an den Messzeitpunkten warm und Übergang gefunden. Bei fünf HRV-Parametern sind die Differenzen in den Messreihen mit 16 Tieren und zwei Messzeitpunkten signifikant verschieden. Die gute Übereinstimmung der Ergebnisse der beiden Messreihen mit sieben und sechzehn Tieren in Tabelle 7 und Tabelle 8 weisen auf die gute Qualität der Messungen hin. Gleichzeitig lässt dies auch den Schluss zu, dass trotz geringer Tieranzahl die gefundenen Tendenzen bei den untersuchten Merkmalen unter den Bedingungen von kalten Umgebungstemperaturen nahe der Frostgrenze relativ zuver-

**Tabelle 7: Adjustierte Mittelwerte und Standardfehler der untersuchten Merkmale sowie die mittlere Milchleistung der Tiere am Messtag bei drei Messzeitpunkten (kalt, Übergang und warm), n= 7**

	Messzeitpunkt		
	kalt	Übergang	warm
Rektaltemperatur (° C)	38,43 ± 0,14	38,83 ± 0,14	38,87 ± 0,14
HR (min <sup>-1</sup> )	71,24 ± 2,66	75,26 ± 2,62	84,35 ± 2,68
RR (ms)	844,34 ± 26,49	802,15 ± 26,07	714,04 ± 26,74
SDNN (ms)	13,25 ± 3,23	12,77 ± 3,13	9,36 ± 3,27
RMSSD (ms)	11,31 ± 3,87	9,67 ± 3,72	3,83 ± 3,93
LF <sub>norm</sub>	80,72 ± 4,62	86,26 ± 4,54	94,48 ± 4,66
HF <sub>norm</sub>	19,28 ± 4,62	13,74 ± 4,54	5,52 ± 4,66
Quotient LF/HF	12,13 ± 5,58	16,53 ± 5,21	22,06 ± 5,38
SD1 (ms)	8,15 ± 2,74	6,98 ± 2,63	2,56 ± 2,78
Tagesmilchleistung (kg/ Tier) <sup>1)</sup>	31,14 <sup>a</sup> ± 6,26	39,93 <sup>c</sup> ± 3,60	47,17 <sup>b</sup> ± 4,38

<sup>1)</sup> Milchleistung ist ein nichtadjustierte Mittelwert.

<sup>a,b</sup> Verschiedene Buchstaben in einer Zeile bedeuten Signifikanz.

**Tabelle 8: Adjustierte Mittelwerte<sup>1)</sup> und Standardfehler der untersuchten Merkmale sowie die mittlere Milchleistung der Tiere am Messtag bei zwei Messzeitpunkten (Übergang und warm), n= 16**

	Messzeitpunkt	
	Übergang	warm
Rektaltemperatur (° C)	38,80 ± 0,08	38,74 ± 0,08
HR (min <sup>-1</sup> )	77,30 ± 1,93	85,75 ± 1,73
RR (ms)	779,74 ± 18,75	701,35 ± 16,76
SDNN (ms)	10,42 ± 1,14	9,83 ± 1,13
RMSSD (ms) <sup>1)</sup>	7,65 <sup>a</sup> ± 1,49	4,67 <sup>b</sup> ± 0,42
LF <sub>norm</sub>	87,87 <sup>a</sup> ± 1,61	94,49 <sup>b</sup> ± 1,61
HF <sub>norm</sub>	12,13 <sup>a</sup> ± 1,61	5,51 <sup>b</sup> ± 1,61
Quotient LF/HF	9,14 <sup>a</sup> ± 1,22	22,26 <sup>b</sup> ± 1,22
SD1 (ms) <sup>1)</sup>	5,34 <sup>a</sup> ± 1,06	3,49 <sup>b</sup> ± 0,30
Tagesmilchleistung (kg/ Tier) <sup>1)</sup>	37,36 <sup>a</sup> ± 6,48	46,39 <sup>b</sup> ± 4,42

<sup>1)</sup> RMSSD; SD1 und Milchleistung sind nichtadjustierte Mittelwerte.

<sup>a,b</sup> Verschiedene Buchstaben in einer Zeile bedeuten Signifikanz.

lässig sind. Größere Abweichungen zwischen den adjustierten Mittelwerten der Messreihen mit sieben und sechzehn Tieren in den Messzeitpunkten Übergang und warm sind bei den Merkmalen SDNN und LF/HF darauf zurückzuführen, dass die Datenreihen aus sechzehn Tieren (Tabelle 8) vor der Varianzanalyse logarithmisch transformiert wurden. Die Rücktransformation der adjustierten Mittelwerte stellt dann eher den adjustierten Median dar und nicht den adjustierten Mittelwert wie bei der Messreihe mit sieben Tieren (Tabelle 5). Die aufgeführten mittleren Tagesmilchleistungen stellen keine adjustierten Mittelwerte dar, sondern sind arithmetische Mittelwerte der Milchleistungen der Tiere am jeweiligen Messtag zur Charakterisierung der konkreten Leistung am Tage der Messung.

Der stetige Abfall der durchschnittlichen RR-Intervalllänge bzw. der Anstieg der Herzschlagrate von kalt zu warm deutet auf eine zunehmende Kreislaufbelastung der Tiere durch thermoregulatorische Aktivitäten hin, während sich die Rektaltemperaturen in den drei Temperaturbereichen noch nicht wesentlich unterscheiden. Die Thermoregulationsmechanismen griffen demzufolge auch bei den relativ hohen Temperaturen um 26 °C bis 27 °C (Tabelle 3) noch nicht in die Beeinflussung der Körpertemperatur ein. Der Parameter SDNN zeigte keine erkennbaren Unterschiede zwischen den gemessenen Temperaturbereichen. Die Gesamtvariabilität der erfassten RR-Intervall-Reihen war von den unterschiedlichen Temperaturen nicht beeinflusst. Die RMSSD als Ausdruck der Kurzzeitvariabilität zeigte hingegen deutliche Unterschiede im Vergleich der Messzeitpunkte. Bei der Messreihe mit 16 involvierten Tieren (Tabelle 8) ist die Differenz für die Messzeitpunkte Übergang und warm signifikant verschieden. Die warmen Temperaturen führten zu einer Verringerung der HRV bzw. der parasympathischen Komponente in deren vegetativer Steuerung.

Der Parameter  $LF_{norm}$  wies von kalten zu warmen Temperaturen eine gleichmäßig steigende Tendenz auf. Bei Betrachtung von nur zwei Messzeitpunkten mit 16 untersuchten Tieren stellte sich die Differenz zwischen Übergang und warmen Temperaturen auch signifikant dar. Eine entgegengesetzte und noch deutlichere Tendenz wies die Höhe der normierten HF-Einheiten auf, wobei die Differenz zwischen den Messzeitpunkten Übergang und warm relativ größer ausfiel als zwischen Übergang und kalt. Werden wiederum die Messreihen mit 16 Tieren und nur zwei Messzeitpunkten betrachtet, so lag hier der  $HF_{norm}$ -Wert bei den warmen Temperaturen signifikant niedriger als bei Übergangstemperaturen. Während  $HF_{norm}$  ein Parameter war, der relativ sicher Auskunft über die Vagusbeteiligung an der HRV gab, war andererseits  $LF_{norm}$  nicht nur von sympathischen sondern auch von anderen Komponenten beeinflusst. Erst der Quotient LF/HF ließ hier Aussagen zur sympathovagalen Balance zu. LF/HF stieg über alle drei Messzeitpunkte von kalt zu warm an. Wobei der Anstieg von Übergang zu warm am größten war.

Dieser Unterschied war bei Betrachtung der Messreihe mit 16 Tieren signifikant. Die sympathovagale Balance verschob sich offensichtlich mit zunehmender Temperatur in Richtung Sympathikus. Ebenso wie die beiden anderen, die Aktivität des Parasympathikus charakterisierenden Parameter (RMSSD und  $HF_{norm}$ ), zeigte der Parameter SD1 ein analoges Verhalten, welches einen Rückgang von kalt zu warm darstellte und die Differenz besonders groß war zwischen den Messzeitpunkten Übergang und warm. In der Messreihe mit 16 Tieren und zwei Messzeitpunkten war die Differenz signifikant.

Es fiel auf, dass es sich bei vier von fünf Parametern (RMSSD,  $HF_{norm}$ , LF/HF und SD1), welche zwischen den Messzeitpunkten Übergang und warm (Tabelle 8) einen signifikanten Unterschied aufwiesen, um Merkmale handelte, die bei den warmen Bedingungen eine abnehmende Aktivität des Parasympathikus und eine Verschiebung der sympathovagalen Balance in Richtung Sympathikus anzeigten, die Tiere also signifikant mehr belastet waren als unter den Übergangsbedingungen.

### 3.5 Diskussion

In einem Tachogramm einer RR-Messreihe lassen sich prinzipiell zwei Schwingungsanteile erkennen und analysieren. Zum einen kurze, schnelle Schwingungen, die die sogenannte Kurzzeitvariabilität widerspiegeln und langsamere Schwingungen, die die Langzeitvariabilität darstellen (CERUTTI ET AL., 1995). Kurzzeitvariabilität entsteht durch schnelle Änderungen der RR-

Intervalllänge innerhalb von ein bis zwei Herzschlägen und ist rein parasympathisch reguliert. Sie lässt sich sehr gut mit Hilfe verschiedener HRV-Parameter wie RMSSD, HF oder SD1 (Tabelle 4) quantifizieren (TASK FORCE, 1996). Die Langzeitvariabilität kann nur mittels der Leistung im LF-Bereich nach einer Frequenzanalyse oder mit dem geometrischen Parameter SD2 abgeschätzt werden, wobei die LF-Leistung sowohl vom Parasympathikus als auch vom Sympathikus beeinflusst wird und über die anteiligen Verhältnisse der beiden Antagonisten am Zustandekommen des LF-Bereiches keine einheitliche Meinung herrscht (CERRUTI ET AL., 1995; AKSELROD, 1995; TASK FORCE, 1996). Zur Quantifizierung der sympathovagalen Balance wird das Verhältnis der Leistungen im LF- und HF-Bereich (LF/HF) herangezogen. Sinkt der parasympathisch beeinflusste HF-Anteil, so wird der Quotient größer und es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Balance in Richtung Sympathikus verschoben hat. Steigen die Leistungen in beiden Frequenzbereichen gleichmäßig an, bleibt der Quotient gleich und damit das Verhältnis zwischen sympathischer und parasympathischer Aktivität bei der HR-Regulation.

Nur wenige Arbeiten befassten sich in der Vergangenheit mit Messungen der HRV bei Milchrindern. Dabei wurden HRV-Messungen zwar immer zur Qualifizierung oder Quantifizierung verschiedener Belastungen verwendet, die spezifischen Messsituationen und Ausgangspunkte waren jedoch oft sehr verschieden. Es wurden unterschiedliche Haltungssysteme, Rassen, Laktationsstadien, Lebendmassen und Alter betrachtet und Messungen in differenten Situationen wie Ruhe, Stehen, Bewegung oder während verschiedener Abschnitte eines Melkprozesses durchgeführt. Die ermittelten Ergebnisse der HRV-Studien sind deshalb auch nur sehr begrenzt untereinander vergleichbar. Eine geringe Anzahl Studien und die teilweise sehr verschiedenen Messsituationen sind auch der Grund, warum es für Milchrinder oder auch andere Nutztierarten keine Angaben zu Normalbereichen der einzelnen HRV-Parameter geben kann, wie sie im Humanbereich z.B. durch die TASK FORCE (1996) angegeben werden. Die absoluten Parameterwerte der vorliegenden Studie sind daher mit denen anderer Studien nur sehr eingeschränkt vergleichbar. Mit der Untersuchung von HRV-Parametern bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen wurde in den eigenen Untersuchungen der Versuch unternommen, eine eventuelle Belastung der Tiere durch orts- und jahreszeitlich übliche Temperaturen nachzuweisen. Dabei waren die Herzschlagraten beim Messzeitpunkt mit warmen Temperaturen denen ähnlich, wie sie von MOHR ET AL. (2002) bei laktierenden Kühen gefunden wurden, während die HR der Tiere bei Übergangstemperaturen annähernd denen der nichtlaktierenden Kühe bei MOHR ET AL. (2002) entsprachen. Ebenfalls vergleichbare Größenordnungen konnten HAGEN ET AL. (2005) bei Messungen im Stehen nachweisen. Dabei fanden sie aber Unterschiede zwischen Schweizer Braunvieh mit einer HR von 77 Schlägen pro Minute und Österreichischem Fleckvieh mit 82 Schlägen pro Minute. Den Unterschied der HR zwischen Stehen und Liegen gaben sie mit 8 % Verringerung an.

In den eigenen Untersuchungen wurden bei kalten Umgebungstemperaturen mit 71 Schlägen pro Minute die niedrigste HR gefunden. GYGAX ET AL. (2008) wiesen jedoch in allen untersuchten Melksystemen noch geringere mittlere Ruhe-HR von unter 70 Schlägen pro Minute bei ihren involvierten Tieren nach. Allerdings lagen die Milchleistungen der Tiere auch deutlich unter denen der eigenen untersuchten Tiere und denen bei MOHR ET AL. (2002). Den Einfluss der Milchleistung auf die HR wies Kovacs (2013a) nach.

Bei der SDNN als Ausdruck der Gesamtvariabilität einer Messreihe konnten in den eigenen Untersuchungen keine gesicherten Unterschiede zwischen den einzelnen Messzeitpunkten mit unterschiedlichen Umgebungstemperaturen gefunden werden. Die Mittelwerte lagen an allen temperaturgeprägten Messzeitpunkten deutlich niedriger als bei liegenden Kühen von HAGEN ET AL. (2005) gemessen wurden, diese Tiere wiesen aber ein geringeres Leistungsniveau auf und gehörten anderen Rassen an. MOHR ET AL. (2002) haben an stehenden oder gehenden Tieren deutlich höhere Werte gemessen, die wiederum sehr gut mit denen stehender Tiere bei HAGEN ET AL. (2005) korrespondieren.

Einer der am sichersten interpretierbaren Parameter der HRV ist die RMSSD. Sie ist geeignet, etwas über den Entspannungszustand des Individuums auszusagen. In nahezu jeder Studie zur Messung der HRV im Zusammenhang mit Belastungen wurde die RMSSD mit herangezogen.

Die in der vorliegenden Studie gemessenen Werte sind mit denen im Ruhezustand bei Milchkühen gemessenen bei HAGEN ET AL. (2005) gut vergleichbar. MOHR ET AL. (2002) haben an stehenden bzw. gehenden Tieren Messwerte um sechs gefunden, was zwischen den eigenen Ergebnissen an liegenden Tieren bei warmen und Übergangstemperaturen liegt. GYGAX ET AL. (2008) maßen dagegen RMSSD von rund 15 bis 18 und KOVACS ET AL. (2013b) sogar von über 34. Zum Messzeitpunkt mit den warmen Temperaturen wurden in den eigenen Untersuchungen signifikant niedrigere RMSSD gefunden als am Messzeitpunkt mit Übergangstemperaturen. Die Tiere waren demnach durch die hohen Temperaturen deutlich weniger entspannt als bei niedrigeren Umgebungstemperaturen.

Zur gleichen Schlussfolgerung gelangt man auch bei Betrachtung des Merkmals  $HF_{norm}$ . Hier lag der Wert für die normierten HF-Einheiten am Messzeitpunkt mit warmen Umgebungstemperaturen erheblich niedriger als bei der Übergangsmessung. Dieser Trend setzte sich von den Übergangstemperaturen zum Messzeitpunkt mit kalten Temperaturen fort, auch wenn hier aufgrund zu geringer Tierzahlen keine Signifikanz erreicht wurde. Das Niveau der gefundenen Werte bei kalten Temperaturen ist mit den Ergebnissen von HAGEN ET AL. (2005) vergleichbar, während MOHR ET AL. (2002) sowohl bei laktierenden als auch bei nichtlaktierenden Tieren deutlich geringere Werte (1,8 bzw. 2,1) gefunden haben. In der Studie von KOVACS ET AL. (2013b) wurden dagegen sogar 42,1  $HF_{norm}$ -Einheiten bei ruhenden Holstein-Friesian-Kühen mit durchschnittlich 38 kg Milchleistung je Tier und Tag gemessen.

Die Anzahl der  $LF_{norm}$ -Einheiten lag in den eigenen Untersuchungen bei warmen Temperaturen mit 94,5 signifikant höher als bei Übergangstemperaturen mit 87,9. Wie auch beim Parameter  $HF_{norm}$  nur mit umgekehrten Vorzeichen setzte sich dieser Trend auch zwischen den Messungen bei Übergangstemperaturen im Vergleich zu kalten Temperaturen fort, ohne statistisch gesichert werden zu können. Dieser Trend kann als Hinweis gewertet werden, dass mit steigenden Temperaturen der Sympathikus zunehmend an der HR-Steuerung beteiligt war, wenngleich am LF-Spektralbereich auch der Parasympathikus beteiligt ist. Gestützt wird diese These auch durch den LF/HF-Quotienten, der mit steigenden Werten eine Verschiebung der sympathovagalen Balance von kalten Temperaturen über Übergangstemperaturen bis zu warmen Temperaturen in Richtung Sympathikus widerspiegelte. Ähnlich hohe Werte wie bei den hier vorgestellten Ergebnissen fanden nur Kovacs et al. (2013b) bei Kühen während des Treibens zum Melken. Ruhten die Tiere waren es nur 56,6  $LF_{norm}$ -Einheiten. Der Quotient LF/HF wurde von diesen Autoren nicht berechnet, sie stützten sich zur Beschreibung der Verschiebung der sympathovagalen Balance zwischen den Zuständen Ruhen und Treiben auf den Quotienten SD1/SD2. MOHR ET AL. (2002) wiesen  $LF_{norm}$ -Werte an stehenden bzw. gehenden Tieren von 59,4 (laktierend) und 59,8 (nichtlaktierend) nach. Der ermittelte LF/HF-Quotient war bei diesen Autoren mit 33,6 (laktierend) und 28,1 (nichtlaktierend) in beiden Fällen höher als bei den eigenen Ergebnissen an jedem der drei Messzeitpunkte. Bei den HRV-Messungen von HAGEN ET AL. (2005) wurden noch geringere  $LF_{norm}$ -Werte von 25,2 (Schweizer Braunvieh) und 19,7 (Österreichisches Fleckvieh) bei aktiven Tieren gemessen. Der Unterschied zu den Ergebnissen, wenn die Tiere lagen, betrug -13 %. Das Milchleistungsniveau war hier mit durchschnittlich 23 kg je Tier und Tag relativ gering.

Der Parameter SD1 korreliert mit den Parametern RMSSD und  $HF_{norm}$  und wird wie diese von der parasympathischen Aktivität des vegetativen Nervensystems bestimmt. Die eigenen Ergebnisse zeigten eine Abhängigkeit von der Temperatur bzw. vom Messzeitpunkt bei Übergangs- und warmen Temperaturen. Wobei SD1 bei warmen Temperaturen signifikant kleiner war als bei Übergangstemperaturen. In der Messreihe mit drei Messzeitpunkten schien sich dieser Trend wiederum auch von Übergang zu kalten Temperaturen fortzusetzen, ohne Signifikanz zu erreichen. Kovacs et al. (2013b) fanden in ihrer Studie mit 44,2 ms erheblich höhere SD1-Werte bei ruhenden Tieren. Beim Treiben wurde dort mit 13,9 ms ein Wert erreicht, der dem der ruhenden Tiere bei kalten Temperaturen in den eigenen Untersuchungen vergleichbar wäre.

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass die untersuchten Milchkühe bei Temperaturen um 27 °C bzw. einem THI um 73 im Vergleich zu Temperaturen um 9 °C und einem THI um 49 deutlich weniger entspannt waren. Dies lässt sich anhand der HRV-Parameter RMSSD,  $HF_{norm}$  und SD1 sicher nachweisen. Die Ausprägung dieser Parameter an den beiden genann-

ten Temperaturmesszeitpunkten macht eine Abnahme der parasymphathischen Komponente in der HR-Steuerung der Tiere deutlich. Die Zunahme der  $LF_{norm}$ -Einheiten und vor allem der sehr starke Anstieg des LF/HF-Quotienten bei warmen Temperaturen bestätigen eine erhebliche Verschiebung der sympathovagalen Balance der HR-Steuerung in Richtung Sympathikus. Damit muss davon ausgegangen werden, dass, anders als in der Literatur häufig berichtet, die Tiere bei den beschriebenen warm-Bedingungen nicht nur unter leichtem Hitzestress litten sondern schon erheblich belastet waren und das trotz der beschriebenen Deckenlüfter, welche mit maximaler Leistung eingeschaltet waren. Eine Unterstützung der Thermoregulation durch technische Hilfsmittel ist hier dringend angezeigt.

Werden die Ergebnisse der Messreihe mit drei Messzeitpunkten ( $n= 7$  Tiere) betrachtet, so sind die Mittelwertdifferenzen aufgrund der geringen Tierzahl zwar nicht statistisch zu sichern, sie weisen aber die gleichen Tendenzen auf wie zuvor beschrieben. Aufgrund der Ergebnisse bei kalten Temperaturen um  $2\text{ °C}$  und einem THI um 37 lässt sich daher postulieren, dass die Milchkühe unter diesen Bedingungen am meisten entspannt bzw. am wenigsten belastet waren. Empfehlungen, wie im Merkblatt 336 der DLG (2005), in denen der optimale Temperaturbereich für Milchkühe mit  $4\text{ °C}$  bis  $16\text{ °C}$  angegeben wird, sind daher zumindest im unteren Bereich zu hinterfragen. Andere Quellen fassen diesen Optimalbereich auch weiter. So geht BIANCA (1968 und 1979) von  $0\text{ °C}$  bis  $16\text{ °C}$  aus, MAHLKOW-NERGE (2007) von  $-7\text{ °C}$  bis  $17\text{ °C}$  und STÖBER (2002) gibt als sogenannten Behaglichkeitsbereich für Milchkühe  $0\text{ °C}$  bis  $15\text{ °C}$  an. TOBER (2014) verweist darauf, dass bei dem heute üblichen Leistungsniveau von etwa 30 kg Milch je Tier und Tag die Thermoregulation der Milchkühe spätestens ab ca.  $15\text{ °C}$  mit effektiven Mitteln unterstützt werden sollte. Der Bereich der optimalen Umgebungstemperatur wird von vielen Faktoren beeinflusst, von denen die Milchleistung nur einer, aber ein sehr wesentlicher ist.

Für die in der vorliegenden Studie unter den warmen Bedingungen gemessene relative Luftfeuchte von rund 46 % wird der Temperaturbereich für beginnenden, leichten Hitzestress mit  $25\text{ °C}$  bis  $29\text{ °C}$  angegeben (DLG, 2005). Die gefundenen Untersuchungsergebnisse sollten daher Anlass sein, diesen Temperaturbereich, ab dem mit Belastungen der Tiere durch Hitze gerechnet werden muss, kritisch zu hinterfragen. Eine bessere Beschreibung wird mit dem THI erreicht. Hier wird der Wert, ab dem mit Stress für das laktierende Tier zu rechnen ist, häufig mit 72 (WIERSMA, 1990; CHASE, 2006; MAČUHOVÁ ET AL., 2008) angegeben. Andere Angaben gehen aber auch schon von Werten ab 65 bis 68 aus (COLLIER ET AL., 2012). Die Ergebnisse der vorgestellten Untersuchungen zeigten eindeutig, dass die Tiere bei einem THI um 73 deutlich belastet waren.

Die vorliegenden Ergebnisse sowie Erkenntnisse aus der Literatur zeigen, dass weitere Untersuchungen zur Klärung der Belastungen der Milchkühe durch thermoregulatorische Prozesse erforderlich sind. Gleichzeitig weisen die Messergebnisse der Parameter der HRV diese als gute Indikatoren aus, um Belastungen der Tiere zu quantifizieren. Nachteilig ist, dass es bislang nicht genügend Untersuchungsergebnisse zum Thema gibt, die es erlauben würden, eindeutige Normbereiche für die einzelnen HRV-Parameter festzulegen, so wie sie im Humanbereich für den Menschen (TASK FORCE, 1996) vorhanden sind. Unterschiedliche Studien lassen sich häufig nur sehr begrenzt miteinander vergleichen. Die Probleme nehmen dabei häufig bereits ihren Ausgangspunkt bei der Wahl verschiedener Parameter. Ein einheitliches Vorgehen wäre hier sehr zu begrüßen.

### 3.6 Literatur

AKSELROD, S. (1995): Components of heart rate variability: basic studies. In: MALIK, M. und CAMM, A.J. (Hrsg.): Heart rate variability. ARMONK, NY: Futura Publishing Company Inc., 147-163.

BIANCA W., (1968): Neuzeitliche Ergebnisse und Aufgaben der Bioklimatologie bei Haustieren. Der Tierzüchter 20, 438-442.

BIANCA W., (1979): Nutztier und Klima. Der Tierzüchter 31, 188-192.

- BORELL VON, E.; LANGBEIN, J.; DESPRÉS, G.; HANSEN, S.; LETERRIER, C.; MARCHANT-FORDE, J.; MARCHANT-FORDE, R.; MINERO, M.; MOHR, E.; PRUNIER, A.; VALANCE, D.; VEISSIER, I.; (2007): Heart rate variability as a measure of autonomic regulation of cardiac activity for assessing stress and welfare in farm animals - A review. *Physiology & Behavior* 92, 293–316
- CERUTTI, S.; BIANCHI, A.M.; MAINARDI, L.T. (1995): Spectral analysis of the heart rate variability signal. In: MALIK, M. UND CAMM, A.J. (Hrsg.): *Heart rate variability*. ARMONK, NY: Futura Publishing Company Inc., 63-74.
- CHASE, L.E. (2006): Climate change impacts on dairy cattle. <http://www.climateandfarming.org/pdfs/FactSheets/III.3Cattle.pdf>, 26.06.2006
- COLLIER, R.J.; HALL, L.W.; RUNGRUANG, S.; ZIMBLEMAN, R.B. (2012): Quantifying Heat Stress and Its Impact on Metabolism and Performance. Department of Animal Sciences, University of Arizona <http://dairy.ifas.ufl.edu/RNS/2012/6CollierRNS2012a.pdf>, 06.01.2014
- DLG (2005): Vermeidung von Wärmebelastungen für Milchkühe. DLG-Merkblatt 336, Frankfurt
- GYGAX, L.; NEUFFER, I.; KAUFMANN, C.; HAUSER, R.; WECHSLER, B. (2008): Restlessness behaviour, heart rate and heart-rate variability of dairy cows milked in two types of automatic milking systems and auto-tandem milking parlours. *Applied Animal Behaviour Science* 109, 167–179.
- HAGEN, K.; LANGBEIN, J.; SCHMIED, C.; LEXER, L.; WAIBLINGER, S. (2005): Heart rate variability in dairy cows—influences of breed and milking system. *Physiology & Behavior* 85, 195–204
- HOOS, O. (2012): 7. HRV-Workshop: Methodik und Anwendung der Herzfrequenzvariabilität. 12. Mai in Kassel
- HOTTENROTT, K. (2012): 7. HRV-Workshop: Methodik und Anwendung der Herzfrequenzvariabilität. 12. Mai in Kassel
- KONOLD, T.; BONE, G.E.; SIMMONS, M.M. (2011): Time and frequency domain analysis of heart rate variability in cattle affected by bovine spongiform encephalopathy. *BMC Research Notes* 4, 259.
- KOVÁCS, L.; KÉZÉR, L.; TÖZSÉR, J. (2013a): Measuring Stress Level of Dairy Cows during Milking Using by Geometric Indices of Heart Rate Variability. *Animal Science and Biotechnologies* 46, 213-217
- KOVÁCS, L.; TÖZSÉR, J.; BAKONY, M.; JURKOVICH, V. (2013b): Changes in heart rate variability of dairy cows during conventional milking with nonvoluntary exit. *J. Dairy Sci.* 96, 7743–7747
- KOVÁCS, L.; JURKOVICH, V.; BAKONY, M.; SZENCI, O.; PÓTI, P.; TÖZSÉR, J. (2014). Welfare implication of measuring heart rate and heart rate variability in dairy cattle: literature review and conclusions for future research. *animal*, 8, pp 316-330. doi:10.1017/S1751731113002140.
- LÖLLGEN, H. (1999): Herzfrequenzvariabilität. *Deutsches Ärzteblatt*, 96 (31-32), 2029-2032.
- MAČUHOVÁ, J.; ENDERS, S.; PEIS, R.; GUTERMANN, S.; FREIBERGER, M.; HADN, B. (2008): Untersuchungen zur Optimierung des Stallklimas in Außenklimaställen für Milchvieh. Einfluss des Außenklimas auf das Stallklima und das Liegeverhalten von Milchkühen. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft
- MADER, T.L.; DAVIS, M.S.; BROWN-BRANDL, T. (2006): Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 84, 712-719
- MAHLKOW-NERGE (2007): Kühe fürchten Hitze. *Nutztierpraxis aktuell* 21:4-10
- MOHR, E.; LANGBEIN, J.; NÜRNBERG, G. (2002): Heart rate variability - A noninvasive approach to measure stress in calves and cows. *Physiology & Behavior* 75; 251– 259.

- TASK FORCE (1996): Heart rate variability Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal* 17, 354–381
- TOBER, O.; LOEBSIN, C.; GRÄBER, J. (2012): Beeinflussung des Verhaltens von Milchkühen durch Wärmebelastung in einem frei gelüfteten Außenklima-Laufstall. *Mitteilungen der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei M-V, Heft 49*, 73-79
- TOBER, O; LOEBSIN, C. (2013): Das Verhalten von laktierenden Kühen in einem Außenklima-Laufstall in Abhängigkeit von der Stalllufttemperatur. *Berliner und Münchner Tierärztliche Wochenschrift* 126, Heft 9/10, 388-393
- TOBER, O. (2014): Wärmehaushalt von Hochleistungskühen. *Agrarmanager Juli 2014*, 80-85
- WIERSMA, F. (1990): Temperature-humidity index table. Department of Agricultural Engineering, The University of Arizona.

## 4 Minderungsmöglichkeiten von Hitzestress am Beispiel von Zusatzlüftung

C. Loebstin, M. Fiedler, O. Tober, G. Hoffmann, S. Hempel, T. Amon

### 4.1 Was ist Hitzestress?

Jedes Säugetier besitzt einen spezifischen Temperaturbereich, in dem es ohne Anpassungsreaktion seine Körpertemperatur konstant halten kann – die thermoneutrale Zone. Sie wird begrenzt durch die obere und untere kritische Temperatur. Bei einer Umgebungstemperatur unterhalb der unteren kritischen Temperatur beginnt das Tier, die Wärmeproduktion zu erhöhen. Steigt die Temperatur über die obere kritische Temperatur, muss die Wärmeabgabe durch das Tier gesteigert werden.

Für Milchrinder wird die thermoneutrale Zone häufig für den Bereich von 4 bis 16 °C angegeben. In Abhängigkeit von der Milchleistung kann der Bereich der thermoneutralen Zone durchaus variieren (HEIDENREICH ET AL., 2004; ZÄHNER, 2001).

Da aufgrund des Zuchtfortschritts das Leistungsniveau der modernen Milchviehassen in den letzten Jahren deutlich angestiegen ist und Kühe zwar als kälterestistent, aber wenig hitzestabil gelten, besteht die Frage, inwieweit die obere kritische Temperatur von 16 °C noch als aktuell angesehen werden kann.

Durch den erhöhten Stoffwechsel auf Grund der gestiegenen Leistungen müssen die Tiere, um eine Überhitzung zu vermeiden, ihre überschüssige Wärme an die Umwelt abgeben. Hohe Umgebungstemperaturen führen häufig dazu, dass die Tiere diese Zusatzwärme nicht in ausreichendem Maße an die Umwelt weiterleiten können. Das Gleichgewicht zwischen Wärmeproduktion und –abgabe ist gestört und es kommt zu einer Hitzebelastung für die Tiere, es entsteht Hitzestress.

Die Anzeichen für das Auftreten von Hitzestress bei Milchrindern können vielfältig sein. Ebenso verhält es sich mit deren Auswirkungen. In Tabelle 9 sind einige Anzeichen und Auswirkungen von Hitzestress bei Milchrindern aufgezeigt.

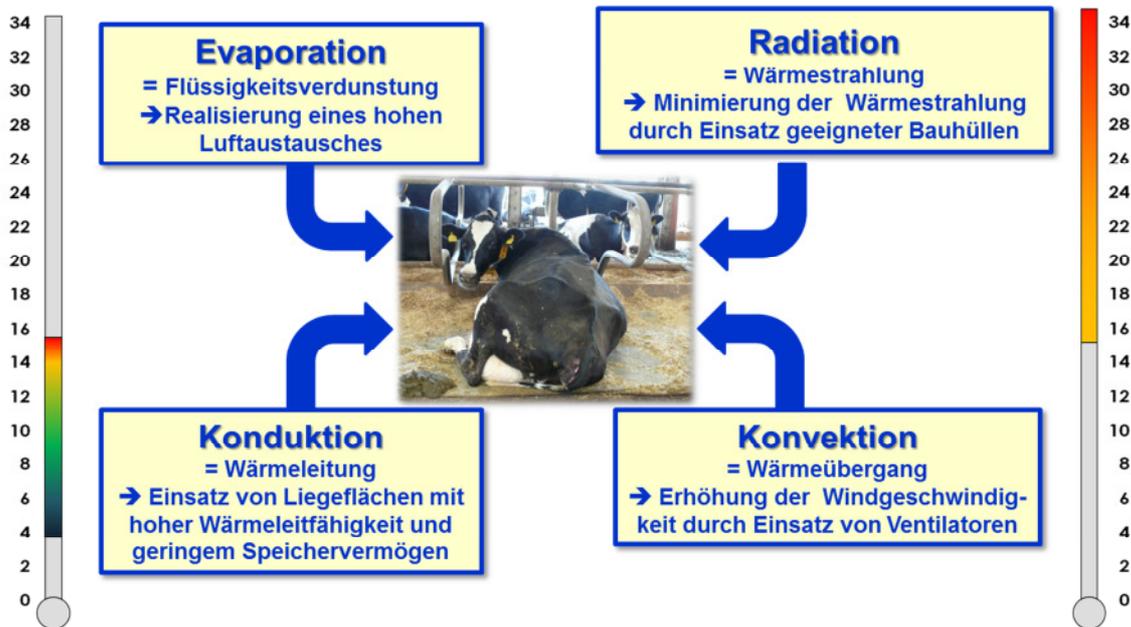
**Tabelle 9: Anzeichen und Auswirkungen von Hitzestress (nach HEIDENREICH, 2009; ZENTNER, 2008)**

Anzeichen von Hitzestress	Auswirkungen von Hitzestress
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhte Atemfrequenz, pumpende Atmung</li> <li>• Reduzierung der Futteraufnahme</li> <li>• Erhöhung der Wasseraufnahme</li> <li>• Physiologische Erhöhung der Körpertemperatur auf 39 bis 40 °C</li> <li>• Tiere liegen wenig</li> <li>• Kopf-Hals gestreckt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abfall der Milchleistung</li> <li>• Sinkende Milchfett- und Milcheiweißgehalte</li> <li>• Schlechte Fruchtbarkeit</li> <li>• Erhöhte embryonale Sterblichkeit und Abortrate</li> <li>• Bei Auftreten von Hitzestress in den letzten 3 Trächtigkeitsmonaten: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Geringere Geburtsgewichte der Kälber</li> <li>– Stoffwechselprobleme nach der Abkalbung</li> <li>– Milchleistungseinbußen in der Folgelaktation</li> </ul> </li> </ul>

## 4.2 Thermoregulation

Mögliche Minderungsmaßnahmen bei Hitzestress können einerseits durch das Tier selbst als auch andererseits durch die Haltungsumwelt getroffen werden.

Durch die eigenen Mechanismen der Thermoregulation ist es Rindern möglich, den hohen Stalltemperaturen bis zu einem gewissen Maß zu begegnen. Die Wärmeabgabe beim Rind erfolgt durch Radiation, Konduktion, Konvektion und Evaporation und kann durch geeignete Maßnahmen unterstützt werden (Abbildung 2).



**Abbildung 2: Möglichkeiten der Thermoregulation**

Unter Radiation versteht man die Wärmeabgabe durch Strahlung. Beeinflusst wird dieser Mechanismus einerseits von der Haltungsumwelt in Form der Oberflächentemperatur der raumumschließenden Teile sowie andererseits von der Temperatur der Körperoberfläche der Kuh als auch der Größe der effektiv strahlenden Fläche.

Die Konvektion, der Wärmeübergang, wird umweltseitig von der Temperatur, der Luftfeuchte sowie der Windgeschwindigkeit bestimmt. Die Luftschicht über dem Tierkörper erwärmt sich und steigt auf, so dass kältere nachfolgt. Bei erhöhten Windgeschwindigkeiten kann die Wärmeabgabe somit gesteigert werden (SCHWALM, 2006). Dieser Effekt ist auch als Windchill-Effekt bekannt. Dabei spielen neben der Körperoberflächentemperatur der Kuh und der Größe der effektiv wirksamen Körperoberfläche auch die Form und Ausbildung der Oberfläche ebenfalls eine Rolle

Konduktion ist die Wärmeabgabe durch Leitung, d. h. es erfolgt eine direkte Übertragung von Energie von der wärmeren in die kältere Schicht. Die Größe der effektiv wirksamen Kontaktfläche sowie die Temperatur der Oberfläche auf der Tierseite stehen der Temperatur, der Wärmeleitfähigkeit und dem Speichervermögen der Kontaktfläche auf der Umweltseite gegenüber.

Neben den genannten trockenen Formen der Wärmeabgabe (sensible Wärmeabgabe) gibt es noch die feuchte Wärmeabgabe (latente Wärmeabgabe), die durch Verdunstung von Wasser auf der Haut oder den Atemwegen gekennzeichnet ist und auch als Evaporation bezeichnet wird (SCHWALM, 2006). Das Atemvolumen und die Atemfrequenz des Tieres entscheiden mit, wie viel Feuchtigkeit das Tier durch Hecheln an die Umwelt abgeben kann. Die Wärmeabgabe über die Körperoberfläche durch Schwitzen hängt in entscheidendem Maße von der Luftfeuchte der Umgebung ab.

### **4.3 Unterstützung der Wärmeregulation**

Umweltseitig kann der bei hohen Temperaturen notwendige Wärmeentzug für die Tiere durch geeignete Stallbaulösungen als auch durch eine angepasste Klimatisierung unterstützt werden. Dies sollte vorbeugend am besten vor der Bewirtschaftung des Stalles veranlasst werden. Hierzu zählen alle baulichen Maßnahmen, die den natürlichen Luftwechsel steigern und für einen verminderten Wärmeeintrag in den Stall sorgen (BÜSCHER, 2009).

Durch den Einsatz geeigneter Baumaterialien einschließlich der Farbgestaltung der Dächer ist eine Reduzierung des Wärmeeintrags über das Dach durch eine verminderte Abstrahlung (Radiation) möglich. Der Stall sollte so konzipiert sein, dass ein hoher Luftaustausch garantiert und die durch Atmung und Schwitzen produzierte Feuchtigkeit (Evaporation) der Tiere in ausreichendem Maße an die Umgebungsluft abgegeben werden kann.

Eine weitere Möglichkeit, den Tieren die Abgabe von Wärme zu erleichtern, kann durch eine geeignete Liegeflächengestaltung erreicht werden. Milchrinder sollten 12 Stunden und mehr am Tag im Liegen verbringen.

Einen großen Einfluss auf die Verweildauer der Tiere auf den Liegeflächen hat u.a. die Wärmeleitfähigkeit der entsprechenden Liegefläche. Es erfolgt ein Wärmeaustausch zwischen Tier und Liegefläche in Form der Konduktion als ein Mechanismus der Thermoregulation. Die Temperaturen zwischen den Kontaktflächen gleichen sich an. Nur wenn die Liegefläche bei niedrigen Umgebungstemperaturen eine Wärmezufuhr zum Tier bzw. bei hohen Temperaturen eine Wärmeabfuhr vom Tier gewährleisten kann, ist eine Verlängerung der Liegezeiten möglich.

Trotz einer fachgerechten Auslegung und Umsetzung der Lüftung sollten im Sommer bei hohen Temperaturen Maßnahmen ergriffen werden, um die normale Lüftung zu unterstützen, da die hochleistenden Milchrinder an die Grenzen ihrer Thermoregulation kommen.

Eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit kann zu einer schnelleren Abkühlung der Luftschicht über die Körperoberfläche führen (Konvektion). Durch das Nachströmen kälterer Luft kann der Wärmetransfer erhöht werden (BRÜSER-PIEPER, 2006). Windgeschwindigkeiten von 1 m/s und höher sind im Stall als erstrebenswert anzusehen (TOBER, 2014). Nach Angaben von HEIDENREICH (2009) wird die höchste Kühlwirkung bei einer Windgeschwindigkeit von 2,5 m/s erreicht.

Es gibt vielfältige Möglichkeiten zur Erhöhung der Windgeschwindigkeit im Stall. Bei freigelüfteten Ställen ist die richtige Standortwahl eine Grundvoraussetzung für eine gute Durchströmung des Stalls. Ein witterungsangepasstes Management der Jalousieöffnungen kann ebenfalls hilfreich sein. Trotzdem sollte auf eine Unterstützungslüftung nicht verzichtet werden.

### **4.4 Geschwindigkeitsmessungen zum Stallklima**

Seit einigen Jahren werden umfangreiche Untersuchungen zum Stallklima, insbesondere zur Windgeschwindigkeit in einem freigelüfteten Außenklimastall für Milchrinder in Zusammenarbeit des Instituts für Tierproduktion der Landesforschungsanstalt Mecklenburg-Vorpommern (LFA MV) und des Leibniz-Instituts für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen ist u.a. eine Darstellung der Windverhältnisse im Stall mit und ohne Einsatz von Deckenlüftern und somit ein Erkenntniszuwachs über die Wirksamkeit der Deckenlüfter im Tierbereich unter Praxisbedingungen.

#### **4.4.1 Vorstellung des Milchviehstalles**

Der ungedämmte Laufstall mit den Abmessungen 34 x 96 m bietet Platz für 380 Milchrinder. Die Längsseiten sind mit Windbrechnetzen versehen und können bei schlechten Wetterlagen zusätzlich durch aufrollbare Jalousien verschlossen werden. Der Dachfirst ist offen. Auf dem mit Trapezblech gedecktem Dach befindet sich in südlicher Ausrichtung eine Photovoltaikanlage. Über dem mittigen Futtergang sind drei Deckenventilatoren mit einem Durchmesser von jeweils 7,20 m installiert, die manuell geregelt werden. Die Lage des Milchviehstalles im Gelände erlaubt es, dass der Stall von Süden und Westen relativ frei angeströmt werden kann, was auch

den Hauptwindrichtungen an diesem Standort entspricht. Die Milchleistung des Betriebes liegt mit 10.790 kg im Jahr 2013 auf einem sehr guten Niveau, was nicht zuletzt auf ein gutes Management zurückzuführen ist

#### **4.4.2 Messmethodik zur Geschwindigkeitsmessung**

In dem Milchviehstall wurden Messungen der Luftgeschwindigkeiten mit Ultraschallanemometern (Windmaster Pro der Firma Gill Instruments Limited, Lymington, Hampshire, UK) durchgeführt. Das Messprinzip der Ultraschallanemometer erfolgt über die Ermittlung der Windgeschwindigkeit anhand der Signallaufzeit: Auf beiden Seiten der Messstrecke wird ein Ultraschallsignal ausgesendet und empfangen. Durch den Wind erreicht das ausgesendete Ultraschallsignal in die eine Richtung den Empfänger schneller als in die entgegengesetzte Richtung. Anhand der beiden Laufzeiten des Signals wird dann die Windgeschwindigkeit bestimmt (z.B. FOKEN, 2006). Die Datenaufzeichnung von den Ultraschallanemometern erfolgte mit Hilfe des am ATB entwickelten Programms „Reader of Ultrasonic Anemometers“ (RUSA) wie von SAMER ET AL. (2011) beschrieben.

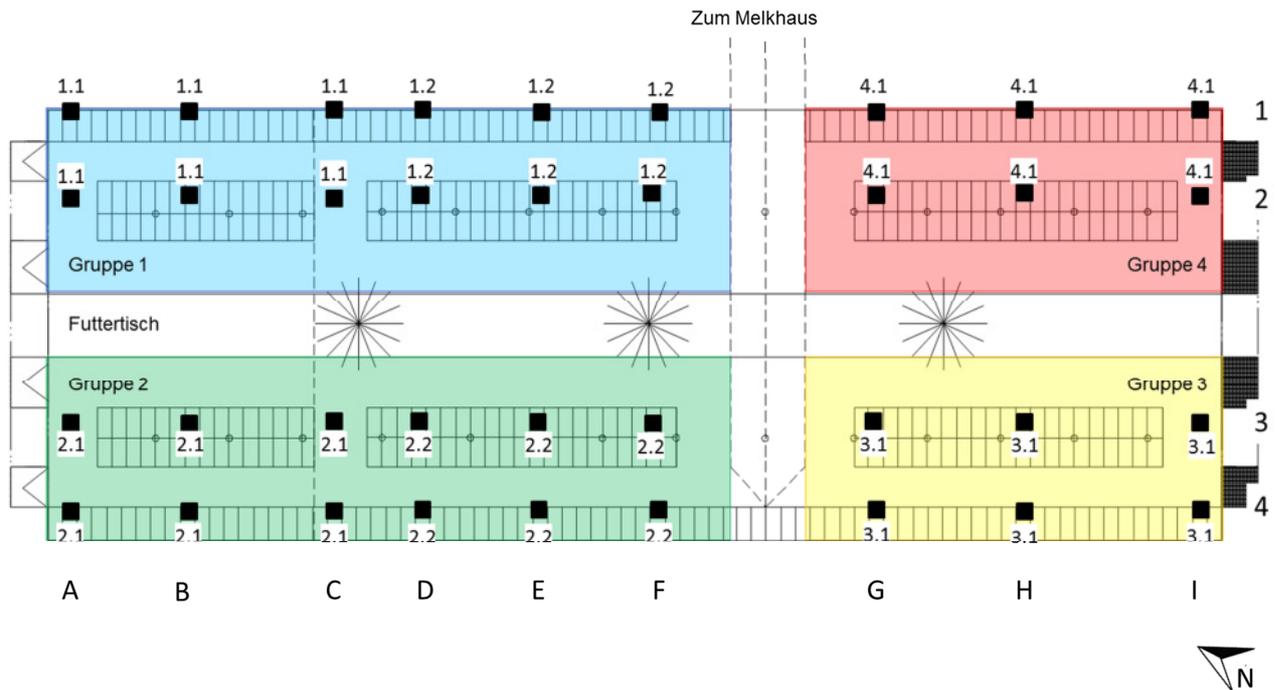
In den hier vorgestellten Untersuchungen wurde eine besondere Sorgfalt auf die korrekte Ausrichtung der Anemometer nach Norden und einer horizontalen Lage gelegt. Die einzelnen Komponenten des Windgeschwindigkeitsvektors wurden mit einer Abtastrate von 1 Hz als Rohsignal aufgenommen. Im Anschluss wurden die so aufgezeichneten Windgeschwindigkeitskomponenten rotiert, so dass sie der meteorologischen Konvention (Ostwind entspricht einer positiven  $u$ -Komponente, Südwind einer positiven  $v$ -Komponente und die Aufwärtsbewegung entspricht einer positiven  $w$ -Komponente) entsprechen.

Die Außenwind- und -klimabedingungen wurden mit Hilfe einer Wetterstation (DALOS 515c-M, F&C Forschungstechnik & Computersysteme GmbH, Gülzow, D) erfasst, die in der Nähe des Milchviehstalls positioniert ist.

#### **4.5 Windprofilmessungen - Kurzzeitmessungen**

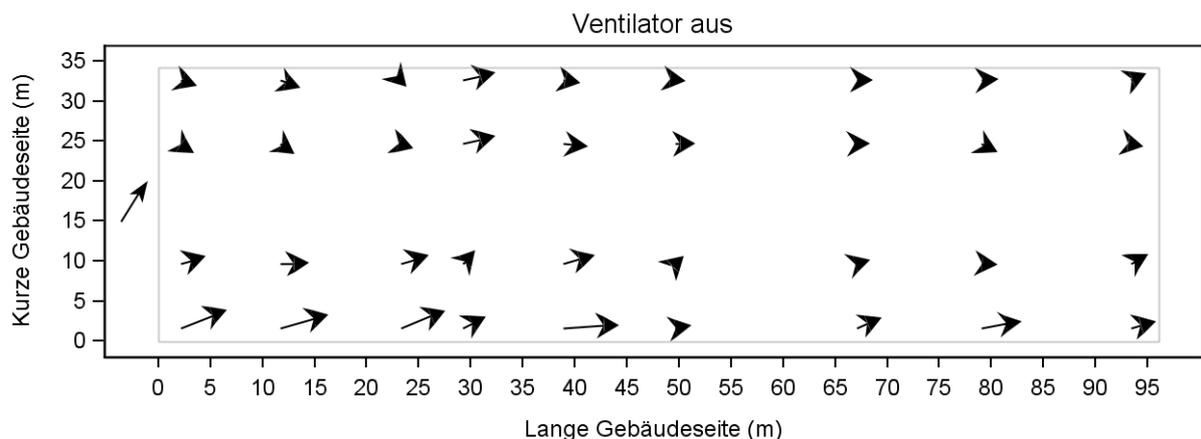
Zielstellung dieser Messaufgabe war es, einen Überblick über die Verteilung der Windgeschwindigkeiten im Tierbereich des gesamten Milchviehstalles zu erlangen. Für die Messungen standen sechs Ultraschallanemometer zur Verfügung, mit denen zeitgleich die drei Windgeschwindigkeitskomponenten ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ) mit dem Programm RUSA erfasst wurden. In insgesamt drei Messkampagnen wurden im Sommer 2011 und 2012 Messungen der Luftgeschwindigkeit im Tierbereich (Höhe der Anemometer: 1,5 m über dem Boden, das entspricht in etwa der Schulterhöhe der Tiere) durchgeführt. Diese Messungen erfolgten immer im Liegebereich und während der Melkzeiten, wenn die Tiere wegen des Melkens abwesend waren. Die Tiere im Stall waren in vier Melkgruppen unterteilt. In zwei der vier Gruppen wurden während der Melkzeit zwölf Messungen erfasst, indem zwei aufeinanderfolgende Messungen an je sechs Messorten durchgeführt wurden. Insgesamt wurden an 36 Messorten, über die gesamte Stallfläche verteilt, Zeitserien aufgenommen (Abbildung 3). Alle Messungen der Luftgeschwindigkeit wurden während der Abwesenheit der Tiere durchgeführt, um eine Beschädigung der empfindlichen Instrumente durch die Tiere auszuschließen. Eine Schutzvorrichtung um die Messinstrumente, z. B. als Käfig, hätte die Messungen erheblich verfälscht; denn VAN WAGENBERG ET AL. (2003) zeigten, dass die Turbulenzintensität durch einen Schutzkäfig für ein Anemometer um 20 % erhöht wurde.

Es wurden Zeitserien mit einer Länge von 180 s aufgenommen, aus denen anschließend Mittelwerte berechnet wurden (weitere Details zum Versuchsaufbau und der Datenauswertung sind bei FIEDLER ET AL. 2013 und FIEDLER ET AL. 2012 einzusehen). Zunächst wurden Messungen durchgeführt ohne die Nutzung der zusätzlichen Ventilatoren im Stall, um einen Eindruck zu bekommen, wie sich die Luftströmung im Stall natürlich verhält.

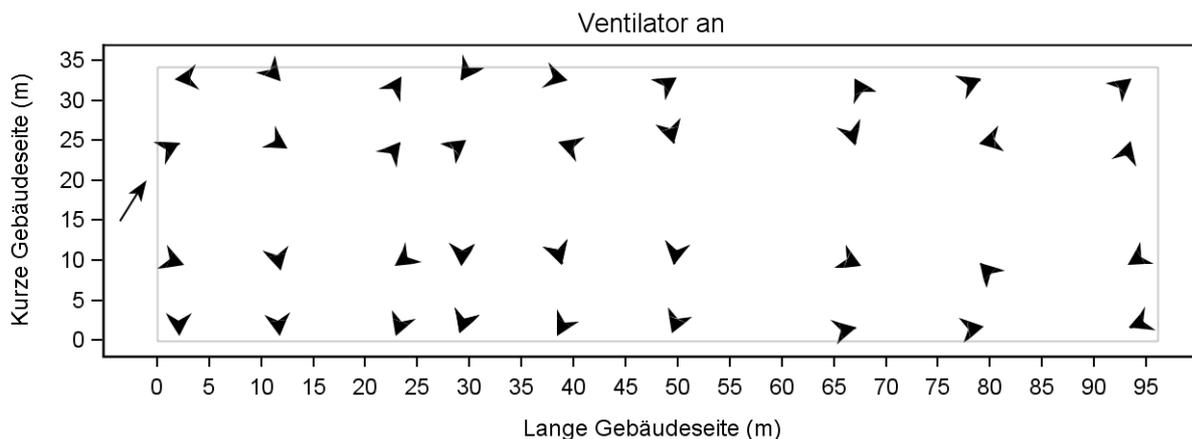


**Abbildung 3: Messorte der durchgeführten Luftgeschwindigkeitsmessungen**

Abbildung 4 zeigt die Luftbewegung ohne Einsatz von Ventilatoren bei einer Anströmung von Südwest, was der Hauptwindrichtung am Standort und der optimalen Anströmung des Milchviehstalles entspricht. Es ist ersichtlich, dass im Stall generell nur sehr niedrige Windgeschwindigkeiten (Länge der Vektorpfeile) gemessen wurden. Die Windgeschwindigkeiten variieren von 0,7 bis 1,45 m/s an der windzugewandten Seite (Luv) hinter dem Netz und an der windabgewandten Seite (Lee) von 0,26 bis 0,09 m/s bei einer Außenwindgeschwindigkeit von 1,5 bis 3,5 m/s. Obwohl der Stall eine hohe Luftwechselrate aufweist, werden auf Grund der Windschutznetze nur sehr geringe Windgeschwindigkeiten insbesondere an der windabgewandten Seite im Stall erzielt. Dies zeigt ungleiche Verhältnisse an unterschiedlichen Orten im Stall und dass selbst bei guter Durchlüftung eine Zusatzlüftung an heißen Tagen an einigen Stellen im Stall notwendig ist. Messungen unter anderen Außenwindrichtungen (z.B. aus Nord) weisen ähnliche Ergebnisse auf, wobei die gemessenen Innenwindgeschwindigkeiten auf der windzugewandten Seite durch das vorgelagerte Melkhaus leicht geringer ausfallen.



**Abbildung 4: Gemessene Luftgeschwindigkeiten und -richtung im Milchviehstall ohne Zusatzventilatoren. Länge der Vektorpfeile um Faktor 5 verlängert (FIEDLER ET AL. 2013)**



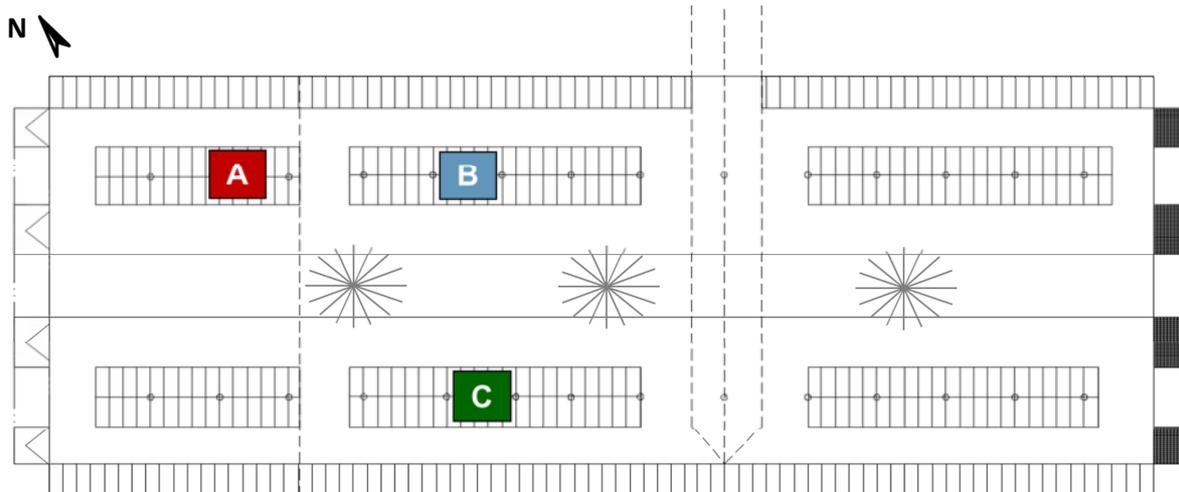
**Abbildung 5: Gemessene Luftgeschwindigkeiten und -richtung im Milchviehstall mit Zusatzventilatoren. Länge der Vektorpfeile um Faktor 5 verlängert.**

Werden die Ventilatoren angeschaltet, verändert sich das Strömungsbild insbesondere auf der günstigen Luv-Seite (Abbildung 5). Es tritt sogar eine Geschwindigkeitsverminderung auf der Lee-Seite einhergehend mit einem Richtungswechsel (insbesondere bei Gruppe 2) der Luftbewegung ein. In diesem Falle scheinen die zusätzlichen Ventilatoren gegen die natürliche Strömung zu arbeiten und weisen in dieser Situation keinen positiven Effekt auf. Selbst auf der Lee-Seite des Gebäudes (insbesondere bei Gruppe 4) konnte keine Erhöhung der Windgeschwindigkeit durch die zusätzliche Lüftung beobachtet werden.

Bei diesen Ergebnissen ist zu beachten, dass es sich hierbei um Kurzzeitmessungen handelte, d.h. sie besitzen lediglich einen Stichprobencharakter, der die Verhältnisse zu diesem einen kurzen Zeitpunkt beschreibt. Eine Verallgemeinerung der Ergebnisse ist nur möglich durch enorm viele Wiederholungen dieser Messungen oder durch Langzeitmessungen, welche die am häufigsten vorkommenden Außenbedingungen miteinbeziehen können.

#### 4.6 Windprofilmessungen - Langzeitmessungen

Die bisherigen Untersuchungen zum Windverhalten im Stall beruhen wie bereits beschrieben auf Kurzzeitmessungen während der Melkzeiten. Um aber Aussagen über die Wirkung im Stall bei unterschiedlichsten Außenwindbedingungen zu erhalten, werden seit Herbst 2012 zusätzlich an den drei Messplätzen A, B und C im Stall die Windgeschwindigkeit und -richtung mit Hilfe von stationären Ultraschallanemometern im 1-Sekunden-Intervall kontinuierlich erfasst (Abbildung 6). Die Ultraschallanemometer sind in einer Höhe von 2,70 m installiert. Diese Einbauhöhe stellt einen Kompromiss dar, um einerseits so dicht wie möglich an den Tierbereich heranzukommen und andererseits die Ultraschallanemometer vor dem Zugriff der Tiere zu schützen.



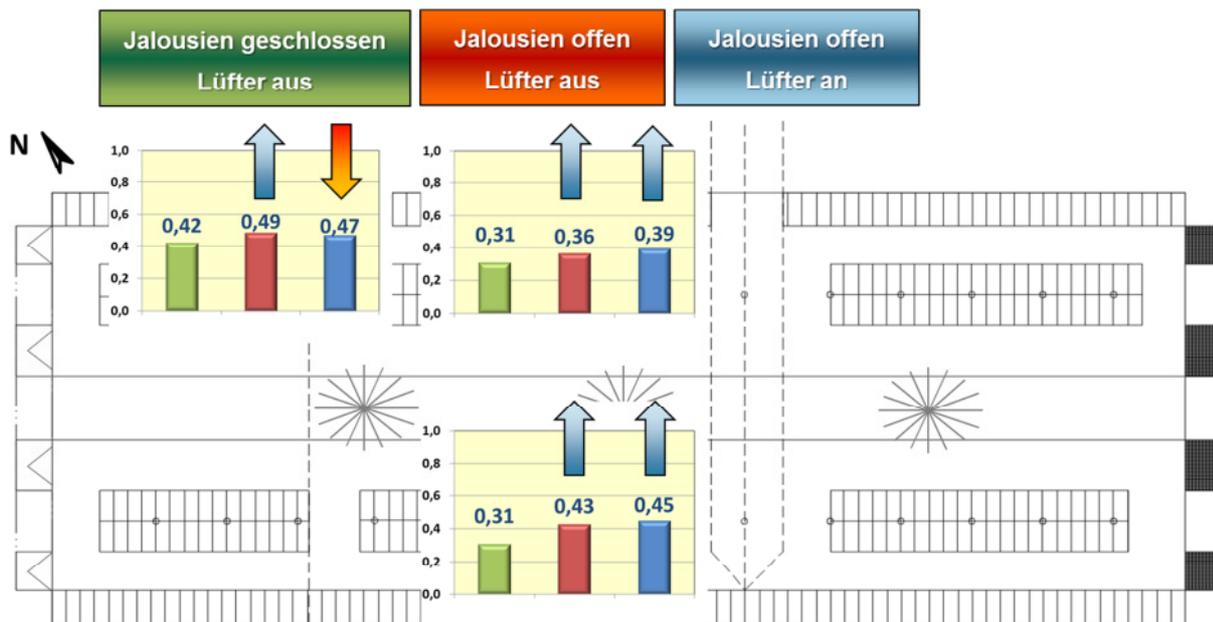
**Abbildung 6: Schematische Darstellung des Stalles mit den drei Messpunkten (ABC) und der Position der Ventilatoren**

Eine Erweiterung dieser stationären Windmessanlage auf insgesamt 8 Messpunkte ist geplant, um das Windverhalten im gesamten Stall noch besser beschreiben zu können. Die notwendigen Daten der klimatischen Außenbedingungen werden mittels einer Wetterstation, wie unter Punkt 4.4.2 beschrieben, gespeichert. Eine erste Auswertung des umfangreichen Datenmaterials soll im Folgenden vorgestellt werden. Als Datengrundlage wurden die Messergebnisse des gesamten Jahres 2013 gewählt.

Verglichen wurden folgende drei Varianten:

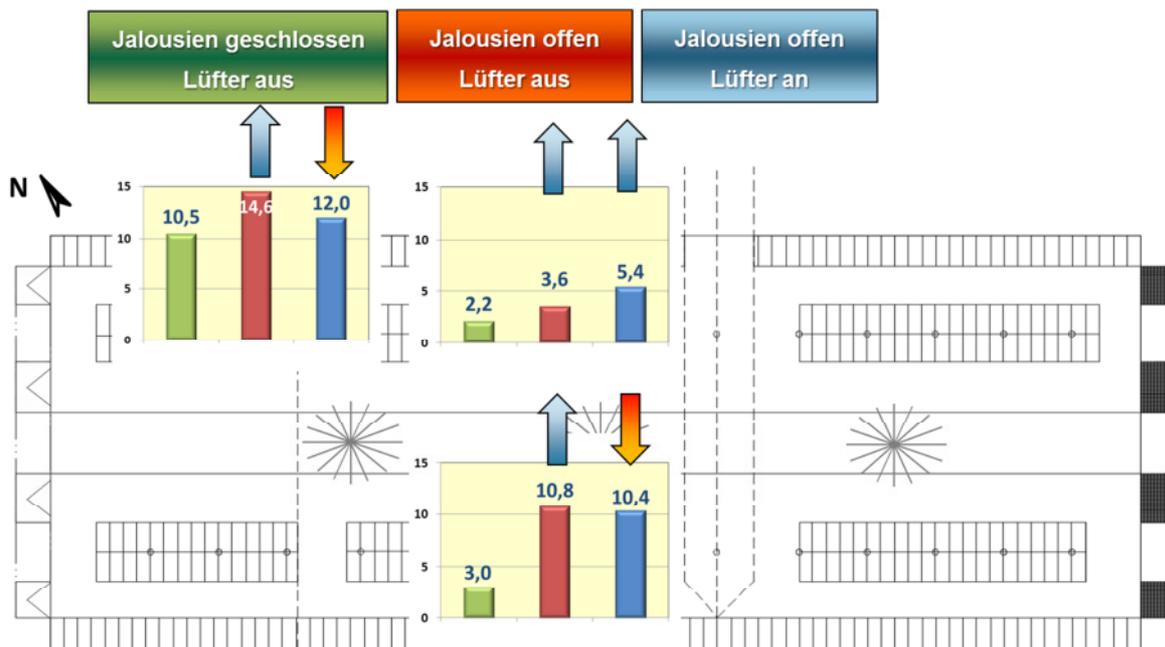
- Jalousien geschlossen und Lüfter ausgeschaltet (bei extrem schlechter Wetterlage),
- Jalousien offen und Lüfter ausgeschaltet (normale Wetterlage)
- Jalousien offen und Lüfter angeschaltet (warme Wetterlage)

In Abbildung 7 sind an den jeweiligen Messpunkten Diagramme dargestellt, die die Durchschnittswerte der Windgeschwindigkeit für die beschriebenen Varianten unabhängig von den Außenwindbedingungen präsentieren. Bei dieser Jahresauswertung für das Jahr 2013 ist ersichtlich, dass sich die gemessenen Windgeschwindigkeiten mit Werten zwischen 0,31 m/s und 0,49 m/s insgesamt auf relativ niedrigem Niveau befinden. Durch das Öffnen der Jalousien bei ausgeschalteten Lüftern kann an allen Messpunkten eine Steigerung der Windgeschwindigkeit erreicht werden (blauer Pfeil), wobei die Messpunkte A und C, die den Hauptwindrichtungen West und Süd am ehesten ausgesetzt sind, auch am meisten davon profitieren. Nach dem zusätzlichen Anschalten der Lüfter bei geöffneten Jalousien stellt sich allerdings eine gewisse Ernüchterung ein. Der Anstieg der Windgeschwindigkeit im Vergleich zur vorherigen Variante ist an den Messpunkten C mit 0,02 bzw. B mit 0,03 m/s nur gering und am westlichsten Messpunkt A kann sogar ein Absenken der Windgeschwindigkeit um 0,02 m/s festgestellt werden (roter Pfeil).

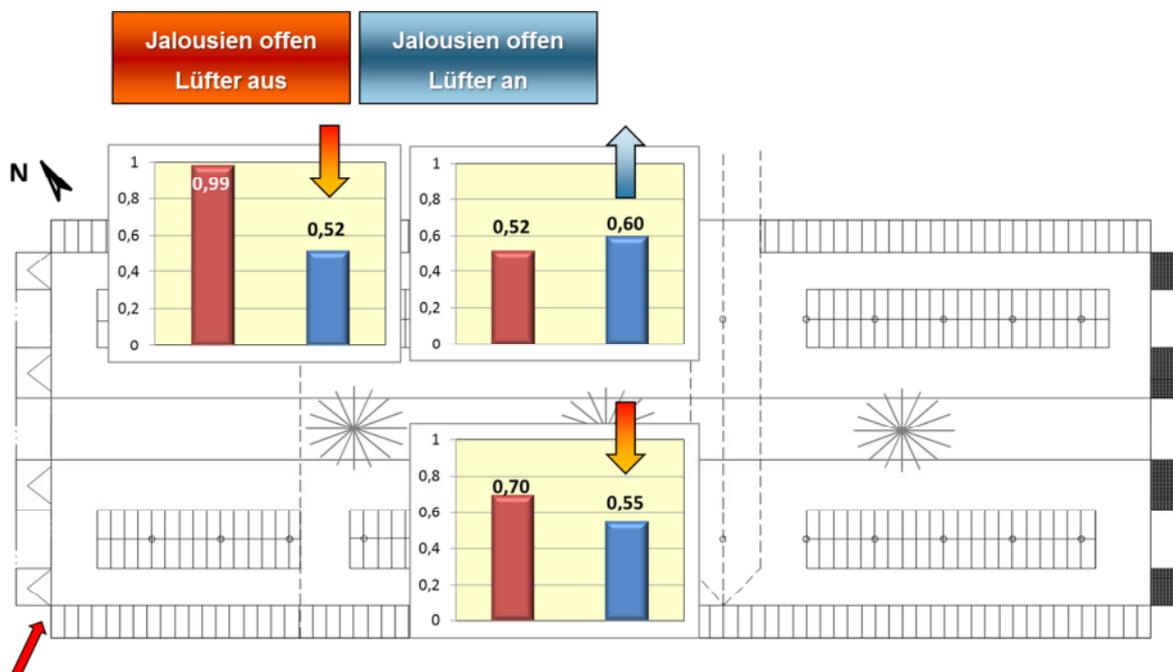


**Abbildung 7: Mittelwerte der Windgeschwindigkeit (m/s) pro Messpunkt bei offenen oder geschlossenen Jalousien bzw. an- oder ausgeschalteter Lüfter (Anordnung im schematischen Grundriss des Stalles bezogen auf das Jahr 2013)**

In gleicher Weise verhalten sich die Anteile der Windgeschwindigkeiten, die größer als 1 m/s sind. Das ist der Anteil, der am effektivsten zur Abkühlung der Tiere durch den Windchill-Effekt beitragen kann (Abbildung 8). Auch hier wird der Einfluss des Außenwindes deutlich. Da bei etwas schlechteren Wetterlagen die Giebeltore schon allein wegen der Futtermittellieferung meist offen bleiben, hat an diesem Messpunkt A der Außenwind einen großen Einfluss. Das zusätzliche Öffnen der Jalousien bringt nur eine geringe Steigerung des Anteils der Windgeschwindigkeit > 1 m/s von 10,5 auf 14,6 % mit sich. Dagegen kann beim südlichen Messpunkt C ein Anstieg von 3,0 auf 10,8 % festgestellt werden. Der Außenwind erreicht durch die geöffneten Jalousien trotz einer gewissen Bremswirkung durch die Windbrechnetze den Messpunkt. Beim mittleren Messpunkt B erhöht sich der Anteil der Windgeschwindigkeit > 1 m/s durch das Öffnen der Jalousien von 2,2 auf 3,6 %. Festzustellen ist allerdings, dass durch das zusätzliche Anschalten der Lüfter an dieser Stelle eine weitere Erhöhung des Anteils ermittelt wurde (5,4 %), im Gegensatz zu den beiden vom Außenwind besser durchlüfteten Messpunkten A und C, wo der Anteil auf 12,0 bzw. 10,4 % sinkt. Die Ursache liegt hier in einem „Gegeneinanderarbeiten“ des Außenwindes und der Lüfter. Die einströmende Außenluft prallt auf die durch den Lüfter in Bewegung versetzte Innenluft. Sowohl die Windgeschwindigkeit der Außenluft als auch die der Innenluft werden in ihrer Wirksamkeit behindert.



**Abbildung 8:** Anteile der Windgeschwindigkeit > 1 m/s pro Messpunkt (%) bei offenen oder geschlossenen Jalousien bzw. an- oder ausgeschalteten Lüftern (Anordnung im schematischen Grundriss des Stalles bezogen auf das Jahr 2013)



**Abbildung 9:** Mittelwert der Windgeschwindigkeit (m/s) pro Messpunkt bei offenen Jalousien bzw. an- oder ausgeschalteten Lüftern und einem Außenwind von 2-3 m/s mit einer Anströmung aus 250° (Anordnung im schematischen Grundriss des Stalles)

Vom Anschalten der Lüfter bei höheren Außentemperaturen erhofft man sich eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit im Stall. In unseren bisherigen Untersuchungen, an allerdings nur drei Messpunkten im Stall, konnte dies nicht durchgängig festgestellt werden. Abbildung 9 zeigt ein Beispiel, bei dem höhere Außenwindgeschwindigkeiten zwischen 2 bis 3 m/s und einer westlichen Anströmung des Stalles durch das Anschalten der Lüfter zum Teil eine drastische Absenkung der Windgeschwindigkeit an zwei Messpunkten im Stall stattfindet. Lediglich der Messpunkt des USA B, der vom Außenwind wenig beeinflusst wird, kann einen Anstieg der Windgeschwindigkeit von 0,52 auf 0,60 m/s aufweisen. Bei niedrigeren Außenwindgeschwindigkeiten ist dieser Effekt in dieser Intensität nicht nachweisbar. Ebenso hat eine Anströmung des Stalles aus einer anderen Richtung auf diese Messpunkte einen ganz anderen Einfluss.

Zusammenfassend bleibt folgendes festzuhalten:

- Durch den Einsatz von Deckenventilatoren wird in Abhängigkeit von den jeweiligen Außenwindbedingungen die Windgeschwindigkeit im Stall nicht grundsätzlich erhöht.
- Bei niedrigen Außenwindgeschwindigkeiten führt das Anschalten der Lüfter zu einer Erhöhung der Windgeschwindigkeit im Stall. Insbesondere Stallbereiche, die vom Außenwind wenig beeinflusst werden, profitieren durch den Einsatz von Deckenlüftern.
- Bei höheren Außenwindgeschwindigkeiten kann es an einigen Punkten im Stall zu einer Reduzierung der Windgeschwindigkeit kommen =“Gegeneinanderarbeiten“ von Außenwind und Lüfter.

#### **4.7 Empfehlungen**

Da wir die Außenbedingungen der Ställe nicht wesentlich ändern können, kommt es auf einen sinnvollen Einsatz der technischen Einrichtungen und deren Regelmöglichkeiten an. Nur mit dem Einbau eines Lüfters ist es nicht getan. Jeder Stall ist trotz vergleichbarer Bauweisen einzigartig, insbesondere durch seine Lage am Standort und den daraus resultierenden Außenbedingungen. Ein Beobachten dieser Randbedingungen ist unverzichtbar. Nach Möglichkeit sollte insbesondere beim Nachrüsten von Lüftern die Regelung dieser z.B. über Sensoren mit den Außenwetterbedingungen gekoppelt werden.

Folgendes gilt es zu beachten:

- Öffnen der Jalousien und damit Nutzung der freien Lüftung, wenn es die Außenbedingungen erlauben. Dabei sollte allerdings das Zusammenspiel von Temperatur und Außenwind besonders im Winter beachtet werden. Damit die freie Lüftung wirksam werden kann, muss die Umgebung des Stalls frei von windbremsenden Hindernissen sein (Schlauchsilos, zu groß gewordenes Buschwerk usw.).
- Beachten der Außenwindbedingungen beim Einschalten der Deckenlüfter, um ein „Gegeneinanderarbeiten“ zu verhindern.

#### **4.8 Schlussfolgerungen**

Nur unter optimalen Bedingungen sind hohe Leistungen der Milchkühe zu realisieren. Dabei spielt die Haltungsumwelt der Tiere eine entscheidende Rolle. Veränderte Bedingungen erfordern allerdings ein angepasstes Management. Da Hochleistungskühe auf Grund ihrer erhöhten Wärmeproduktion bei warmen Umgebungstemperaturen auch in freigelüfteten Ställen häufig unter Hitzestress leiden, ist es sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus tierschutzrelevanten Gründen notwendig, durch geeignete Maßnahmen die Thermoregulation der Tiere zu unterstützen, um auch bei diesen Temperaturen gesunde Tiere mit einer hohen Leistungsfähigkeit zu haben.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen und Fragen, die von Wissenschaft und Ausrüstern beantwortet werden müssen.

- Deckenventilatoren sollten in Abhängigkeit von den Außenwindbedingungen einzeln angesteuert werden können. Wie kann dies bei alten und neuen Lüftungsanlagen unkompliziert umgesetzt werden?
- Bei niedrigen Außenwindbedingungen können aufrollbare Windbrechnetze zu einer Erhöhung der Windgeschwindigkeit im Stall beitragen. Auch hier gilt es, die Umsetzung zu prüfen, wobei z.B. die Wirkung der Netze als Schattenspendler bei intensiver Sonneneinstrahlung nicht außer Acht gelassen werden darf.
- Inwieweit könnte eine Umkehrung der Lüfterdrehrichtung, ein größerer Lüfterdurchmesser und/oder eine veränderte Flügelform bzw. eine veränderte Lüfteranordnung die Effektivität der Lüfter steigern?

#### **4.9 Weiterführende Untersuchungen und Ausblick**

Die nächsten Schritte zur Untersuchung des Durchströmungsverhaltens des Milchviehstalls bestehen in der Aufstockung der Messpunkte für Langzeitmessungen, um eine bessere Übersicht über die räumliche Verteilung der Windgeschwindigkeiten zu bekommen. Eine Veränderung der Lüfteranordnung verbunden mit der Installation eines zusätzlichen Lüfters im Untersuchungsstall soll weiteren Erkenntnisgewinn bringen. Des Weiteren wird das Durchströmungsverhalten des Milchviehstalls auch im Modell (physikalisch im Windkanal und in der numerischen Simulation) untersucht. Bei letzteren beiden Methoden ist es möglich, konstante Randbedingungen festzulegen, um die Erkenntnisse für bestimmte Situationen zu erweitern oder aber Änderungen an der Bauhülle zur Optimierung der Durchlüftung zu untersuchen, die in einem laufenden Betrieb nicht möglich sind. Wie gut die Modelle die Realität abbilden, wird durch den Vergleich von Modellergebnissen und anhand der Feldmessungen überprüft. Ziel dieser weiterführenden Untersuchungen ist es, die Lüftung freigelüfteter Ställe zu optimieren und mehr Erkenntnisse über das Durchströmungsverhalten zu erlangen.

#### **4.10 Literatur**

BRÜSER-PIEPER, CH. (2006): Untersuchungen zur thermischen Belastung von Schlachtrindern beim Straßentransport auf Langstrecken. Dissertation, Tierärztliche Hochschule Hannover

BÜSCHER, W. (2009): Stressminderung durch bauliche-technische Maßnahmen. In: Klimawandel - Konsequenzen für die landwirtschaftliche Nutztierhaltung, Tagungsband 158, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

FIEDLER, M.; BERG, W.; AMMON, C.; LOEBSIN, C.; SANFTLEBEN, P.; SAMER, M.; VON BOBRUTZKI, K.; KIWAN, A.; SAHA, C.: Air velocity measurements using ultrasonic anemometers in the animal zone of a naturally ventilated dairy barn. Biosystems Engineering 116 (3): 276-285, 2013

FIEDLER, M.; HOFFMANN, G.; LOEBSIN, C.; BERG, W.; VON BOBRUTZKI, K.; AMMON, C.; AMON, T.: Luftgeschwindigkeit und Hitzebelastung im Milchviehstall - Auswirkungen auf das Tierwohl. Landtechnik 67 (6): 421-424, 2012

FOKEN, THOMAS: Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden. 2. Auflage, 2006, Springerverlag, ISBN 3-540-38202-X. S202-209

HEIDENREICH, T.; BÜSCHER, W.; CIELEJEWSKI, H. (2004): Vermeidung von Wärmebelastungen bei Milchkühen. DLG Merkblatt 336, Hrsg.: Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft, Frankfurt a.M.

HEIDENREICH, T. (2009): Luftführung und energietechnische Aspekte zur Verringerung von Hitzestress in Rinderstallanlagen. Bautagung, Raumberg-Gumpenstein

- SAMER, M.; LOEBSIN, C.; VON BOBRUTZKI, K.; FIEDLER, M.; AMMON, C.; BERG, W.; SANFTLEBEN, P.; BRUNSCH, R. (2011): A computer program for monitoring and controlling ultrasonic anemometers for aerodynamic measurements in animal buildings. *Computers and Electronics in Agriculture* 79 (1): 1-12
- SCHWALM, A. (2006): Einfluss von Hitzestress auf Parameter der Reproduktion - Thermoregulation und das Verhalten männlicher Lamas (*Lama glama*) unter Berücksichtigung der Bewollung der Tiere. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen
- TOBER, O. (2014): wie reagieren Kühe, wenn es ihnen zu warm ist, 23. Milchrindtag MV, [www.landwirtschaft-mv.de](http://www.landwirtschaft-mv.de); (Zugriff: 16.10.2014)
- VAN WAGENBERG, A. V.; DE LEEUW, M. T. J. (2003): Measurement of air velocity in animal occupied zones using an ultrasonic anemometer. *Applied Engineering in Agriculture* 19, pp. 499-508
- ZÄHNER, M. (2001): Beurteilung von Minimalställen für Milchvieh anhand ethologischer und physiologischer Parameter. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
- ZENTNER, E. (2008): Stallklima im Rinderstall. Fachtagung Rinderproduktion, Raumberg-Gumpenstein 26.11.2008

## **5 Dachformen und Materialien zur Dacheindeckung im landwirtschaftlichen Bauen und deren Einfluss auf die Stallklimagestaltung**

*J. Menning,*

### **5.1 Dachformen**

Dem Dach als oberen Abschluss eines Gebäudes kommt eine Vielzahl von Aufgaben zu. Die wichtigste Aufgabe liegt im Witterungsschutz für den Baukörper. Zusammen mit den Außenwänden trennt das Dach einen definierten Raum von der Umwelt ab und sorgt so mit für die Schaffung eines Innenklimas. Gleichzeitig übernimmt das Dach auch technische und/ oder technologische Aufgaben im Zusammenhang mit der Nutzung des Gebäudes. Es dient als Trägerelement für technische Aufbauten (z.B. Blitzschutz, Belichtungselemente), ist Bestandteil von Lüftungsanlagen, wird als Lager- oder Aufenthaltsraum genutzt usw.

In der Praxis haben sich verschiedene Methoden bei der Einteilung der Dachformen herausgebildet. So wird überwiegend über die Dachneigung die Bezeichnung der Dachform gewählt. Grundsätzlich lassen sich durch diese Methode die Dächer in zwei Kategorien einteilen, Flachdächer mit einer Dachneigung  $< 10^\circ$  und geneigte Dächer mit einer Dachneigung  $> 10^\circ$ . Außerdem spielt dabei noch die Anzahl der Dachflächen eine Rolle. Allerdings ist es nicht möglich, durch diese Methode geschwungene Dächer zu erfassen. Insofern bedarf es einer weitergehenden Strukturierung. Aber nicht nur die Dachansicht als äußeres Zuordnungsmerkmal ist bei der Einteilung der Dächer von Bedeutung. Auch die konstruktiven und bauphysikalischen Elemente bei der Gestaltung des Daches sind besondere Merkmale, die eine Zuordnung der Dächer in bestimmte Kategorien erlauben würden. Schlussendlich können auch Ein- und Anbauten die Definition der Dachform bestimmen. Bei der Betrachtung einer möglichen Übersicht über die verschiedenen Dachformen muss deshalb im Vorfeld klargestellt sein, dass eine Vollständigkeit nicht erreicht werden kann und eine große Varianz in den einzelnen Unterteilungsgruppen möglich ist.

#### **Flachdächer**

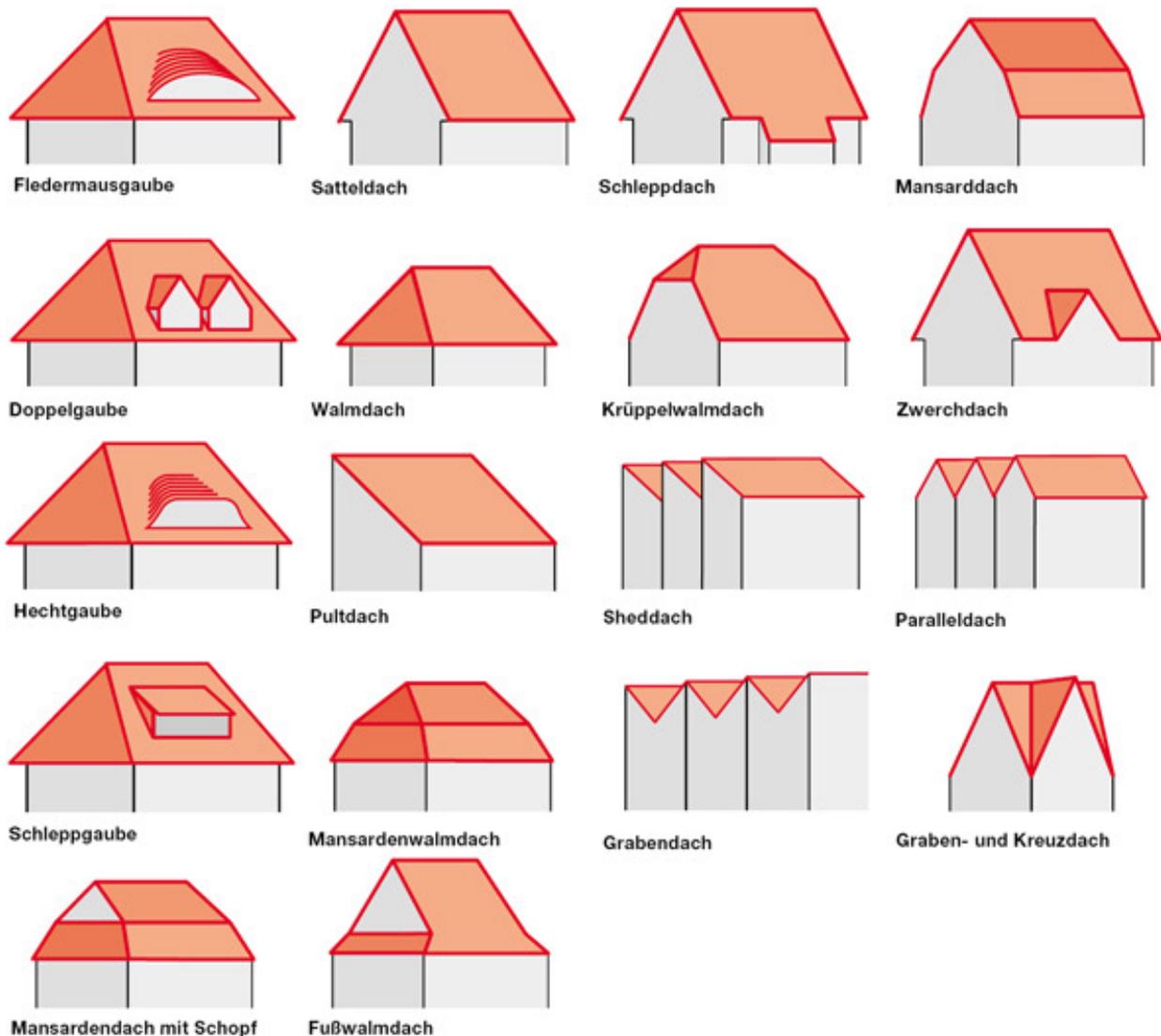
Flachdächer weisen eine Dachneigung von weniger als  $10^\circ$  auf. Die Dachflächen laufen im flachen Winkel zum First oder zu einer mittig angeordneten einfachen Trauflinie. Sofern die Dachflächen zu einer in der Mitte angeordneten Trauflinie abfallen, ist das Dach häufig mit einer kleinen Umrandung, die als Attika bezeichnet wird, versehen. Flachdächer werden überwiegend nicht in der Landwirtschaft eingesetzt, spielen daher kaum eine Rolle und sollen deshalb nicht näher betrachtet werden. Eine besondere Form des Flachdaches stellt das Plattfordach dar. Diese ist in Waage errichtet und weist keine Dachneigung auf.

#### **Geneigte Dächer**

Die Anzahl der Dachformen geneigter Dächer ist sehr groß. Im Grundsatz kann festgestellt werden, dass ab einer Neigung der Dachfläche größer  $10^\circ$  ein geneigtes Dach vorliegt. Dabei können die Anzahl der Dachflächen und die Gradzahl der Dachneigungen abweichend sein. Als Standard ist das Satteldach zu sehen. Beim Satteldach verlaufen 2 gleich dimensionierte Dachflächen von der Firstlinie, die mittig angeordnet ist, zu den Traufen. Die Seitenflächen bilden jeweils gleichschenklige senkrecht aufstehende Giebel dreiecke. Je nach Winkelzahl der Dachneigung spricht man von Satteldächern oder Steildächern. Unterarten des geneigten Daches sind:

- - Walmdach
- - Krüppelwalmdach,
- - Mansarddach
- - Mansardwalmdach

- - Mansarddach mit Schopf
- - Fußwalmdach
- - Zeltdach/ Pyramidendach
- - Rhombendach (Rautendach)
- - Berliner Dach
- - usw.



**Abbildung 10: Schematische Darstellung verschiedener Dachformen (Quelle: Dachdeckerforum)**

Besonders bei Industriebauten wird auf Grund der Ausdehnung der Gebäude häufig auf eine Verkettung mehrerer Dächer zurückgegriffen. Kommen Satteldächer zum Einsatz, spricht man bei einer Verkettung der Dächer von einem Paralleldach (Firstlinien verlaufen parallel zueinander).

Sofern ein geneigtes Dach aus nur einer Dachfläche errichtet wird, spricht man vom Pultdach. Verkettete, also hinter einander angeordnete Pultdächer mit gleicher Ausrichtung der Dachneigung bilden ein Sheddach. Stoßen Pultdächer an der Traufenlinie zusammen, spricht die Praxis von einem Grabendach.

Aus historischer Sicht stellen natürlich auch die Kuppeldächer ein prägendes Bauelement dar und stehen häufig auch als sakrales oder weltliches Symbol. Allerdings ist aus Sicht des landwirtschaftlichen Bauens das Kuppeldach ohne Bedeutung.

Durch Einbauten in die Dachfläche erfolgt eine weitere Untergliederung der Dachformen. Als Einbauten kommen

- Gauben,
  - Doppel-(Mehrfach)-gauben
  - Fledermaus- und Hechtgauben
  - Schleppgauben
- Zwerchhaus
- Loggia
- Dachreiter und Dachlaterne

in den unterschiedlichsten Ausführungen vor.

Für die Nutzung des Dachraumes bzw. bei einem Gebäude ohne Zwischendecke des Gebäudeinnenraumes ist der konstruktive Dachaufbau von großer Bedeutung. Dabei wird in drei konstruktive Grundformen,

- das einschalige Dach
- das zweischalige Dach
- das Umkehrdach

unterschieden. Die Zuordnung richtet sich nach der konstruktiven Anordnung der Dacheindeckung als Witterungsschutzschicht und der Dämmschicht. Liegen beide unmittelbar aufeinander, spricht man vom einschaligen Dach (Warmdach). Wird zwischen Dachhaut und Wärmedämmschicht eine Luftzirkulationsschicht angeordnet, nennt man diese Konstruktion zweischaliges Dach (Kaltdach). In modernen Konstruktionen werden auch die Dämmschicht nach außen und die Dachhaut zum Rauminnen hin angeordnet. Diese Konstruktion wird als Umkehrdach bezeichnet.

## 5.2 Dacheindeckmaterialien

Historisch entwickelten sich die Dacheindeckmaterialien streng regional. Es wurde schlicht das in der Region vorhandene Material, das für einen Wetterschutz geeignet schien, als Dachhaut verwendet. Noch heute prägen solche typischen Dachmaterialien ganze Regionen. Auch der historische Stallbau ist von diesen regionalen Einflüssen geprägt. Dies hat sich aber deutlich gewandelt. In modernen Stallbauten werden die Dächer hinsichtlich Form und Dachhaut den jeweiligen Bedürfnissen angepasst und nicht mehr nach den vor Ort bestehenden Möglichkeiten errichtet. Neben den zuletzt aus Ton und Beton hergestellten Ziegeln haben sich weitere Materialien durchgesetzt wie Faserzementplatten, Metallflächenplatten oder Kunststoffverbundsysteme. Die Farbpalette dieser Materialien ist praktisch unbegrenzt und über RAL Farbnormen abrufbar. Die Formgebung ist bedingt durch die statischen Anforderungen vergleichsweise eingeschränkt. Bei den Faserzementplatten werden praktisch ausschließlich solche mit einer Sinuswellen eingesetzt. Die Faserzementplatte ist bauartbedingt vergleichsweise schwer und erfordert eine umfangreiche Unterkonstruktion. Zudem ist die Größe der Platten eingeschränkt und erfordert damit einen bestimmten Montageaufwand. Ein weiterer Nachteil ist der geringe Widerstand gegen mechanische Beschädigungen. Allerdings bietet eine Faserzementplatte auch deutliche Vorteile. Insbesondere in Ställen, in denen mit einem hohen Luftfeuchtedruck zu rechnen ist, kompensiert das Material der Faserzementplatte die Kondenswasserbildung. In gewissem Umfang kann das Wasser gebunden und wieder abgegeben werden. Außerdem sind Faserzementplatten sehr formstabil bei dauerhafter Wärmeeinwirkung z.B. durch Sonneneinstrahlung. Da die Platten zudem in der Regel im Farbton „Lichtgrau“ produziert werden, ist die Abgabe von Strahlungswärme als eher gering einzuschätzen. Insofern muss der Faserzementplatte bei Einbeziehung des Daches in die Gestaltung des Stallklimas ein hoher Wirkungsfaktor beigemessen werden.

Als Alternative zu den bis Anfang der 90er Jahre als Standardlösung eingesetzten Faserze-

mentplatten hat sich die aus Stahlblech, Weißblech oder Aluminium hergestellte Metallflächenplatte durchgesetzt. Diese werden als Trapezblech, als Sinuswellenprofil oder Falzblech angeboten. Metallflächenplatten haben den unschlagbaren Vorteil, sie in großen Längen mit einem handhabbaren Gewicht herstellen zu können. So können Dachflächen vom First bis zur Traufe durchgängig ohne Stoß ausgelegt werden. Mögliche Undichtigkeiten können so praktisch ausgeschlossen werden. Zudem sind die Unterkonstruktionen in der Regel einfacher und lassen sich mit geringerem Materialaufwand herstellen. Die Montagezeit sinkt entsprechend, was wiederum einen Bauzeiten- und Baukostenvorteil darstellt. Als besonderer Vorteil bei Metallflächenplatten haben sich freitragende Dachkonstruktionen herausgestellt. Durch die Dimensionierung der Sicken in der Platte kann diese statisch so ertüchtigt werden, dass eine Unterkonstruktion bis auf die unbedingt notwendigen beidseitigen Auflagepunkt entfallen kann. Als problematisch sind bei Metallflächenplatten die Materialeigenschaften anzusehen. Insbesondere die Frage des Ausdehnens eines Metalls unter Wärmeeinstrahlung z.B. durch die Sonne kann am Bauteil zu Problemen führen. Schwachpunkte sind hier besonders die Verschraubungen. Aber auch der Wärmedurchgang durch ein Metall kann im Zusammenhang mit der Stallklimagestaltung eine Rolle spielen. Wärme kann praktisch ungehindert durchgeleitet werden und erwärmt die Dachfläche deutlich. In Abhängigkeit zur Erwärmung eines Körpers nimmt aber auch die Wärmeabstrahlung zu, die im Fall eines Stalles dann in das Rauminnere gerichtet ist. Durch helle oder metallisch glänzende Oberflächen lässt sich dieser Effekt zwar reduzieren, nicht aber abstellen. Darüber hinaus bieten metallische Materialien keine Möglichkeit der Aufnahme bzw. Speicherung von Feuchtigkeit. Wasser wird also an einer metallischen Oberfläche kondensieren und abtropfen. Hierfür werden aber von den Herstellern Beschichtungssysteme angeboten, die bis zu 1 Liter Wasser pro m<sup>2</sup> Dachfläche aufnehmen können. Alternativ dazu werden auch Fließmaterialien als Unterspannbahn eingebaut.

In der landwirtschaftlichen Baupraxis haben auch Kunststoffe in unterschiedlicher Form Einzug gehalten. Die klassische Form ist die Lichtplatte, die zur Beleuchtung als eine Form des Dachfensters mit in die Dachfläche eingebaut wird. Darüber hinaus sind aber auch andere Kunststoffe wie Folien und Gewebeplanen im Einsatz.

### **5.3 Dachformen in der Landwirtschaft**

Bei der Errichtung oder dem Umbau von landwirtschaftlichen Nutzgebäuden kommen in der überwiegenden Mehrzahl Satteldächer zur Anwendung. Die Neigung der Dachflächen wird dabei häufig von der Gebäudenutzung und der geplanten Lüftung bestimmt. So sind zwangsbelüftete Ställe in der Regel mit einem flachen Satteldach ausgestattet. Hier wird der Dachraum, der für die Tierhaltung zumeist nicht benötigt wird, bewusst klein gehalten. Hintergrund ist die Minderung der Baukosten durch die Verringerung des umbauten Raumes. Die Dächer sind in der Regel nicht gedämmt, bei der Dachhaut werden meist Faserzementplatten genutzt.

In Ställen mit freier Lüftung ist schon bedingt durch die Erhaltung der Funktionssicherheit der Trauf-First-Lüftung das Dach mit einer Mindestneigung auszuführen. Dies führt dann zwangsläufig zu Gebäuden mit einem deutlich ausgeprägten Satteldach.

Auf gestalterische Elemente wird in Dächern für landwirtschaftliche Gebäude überwiegend verzichtet. Lediglich technisch oder technologisch notwendige Einbauten werden installiert. Dies betrifft dann zumeist Lüftungselemente wie Abluftschächte oder Abdeckhauben für offene Firste, Lichtplatten, aber auch Blitzableiter oder Antennenaufbauten. Eine zunehmende Bedeutung gewinnt die Nutzung des Daches für Photovoltaikanlagen. Stilbildende Elemente wie z.B. eine Walmung wird wegen des Bauaufwandes nicht mehr genutzt.

### **5.4 Versuchsfragestellungen der Einrichtungen zum Themakomplex Stalldach**

Zur Frage, wie ein Stalldach optimal ausgelegt wird, welche Materialien zu empfehlen sind, wie gestalterische und funktionale Zwänge aufeinander ausgerichtet werden müssen oder schlicht die Frage nach den Baukosten wurden bereits in einer Reihe von Versuchsanstellungen innerhalb der im Arbeitskreis Stallklima vertretenen Einrichtungen untersucht. Allerdings waren die Ziele der Untersuchungen nicht bautechnischer Art sondern vielmehr auf die Intention der

Stressvermeidung für die Tiere bzw. auf die Optimierung und Verbesserung von Haltungsmethoden ausgerichtet. Hintergrund für die meisten Versuchsfragen war die Forderung aus der Tierhaltung, und hier besonders der Haltung von Milchrindern und deren Nachzucht, bei steigender Lebensleistung der Tiere und überwiegender Stallhaltung klimatische Bedingungen sicher stellen zu können, die dem Tierwohl gerecht werden. Entsprechend handelte es sich deshalb überwiegend um Versuchsanstellungen und Untersuchungen in Ställen mit freier Lüftung. Die Versuchsfragen reichen von der Ermittlung theoretischer Grundlagen zur Luftführung am und im Stall über die Erfassung von Strömungsverhältnissen im Gebäude bei unterschiedlichen Temperaturbedingungen bis hin zu konkreten Systemvergleichen und der Bewertung von eingesetzten Baumaterialien und deren Wirkung auf das Stallklima.

Im Nachfolgenden sind eine Auswahl von Versuchsthemen beschrieben und die Ergebnisse aufgeführt. Die Versuche und Untersuchungen wurden durch, an Einrichtungen der im Arbeitskreis Stallklima eingebundenen, Institutionen und deren Mitarbeiter entwickelt, durchgeführt und ausgewertet. Weitergehende Informationen können über den Arbeitskreis Stallklima oder die Autoren direkt eingeholt werden (Kontaktangaben: siehe Impressum):

#### 5.4.1 Klimamessung in frei belüfteten Milchviehställen

*C. Loebstin*

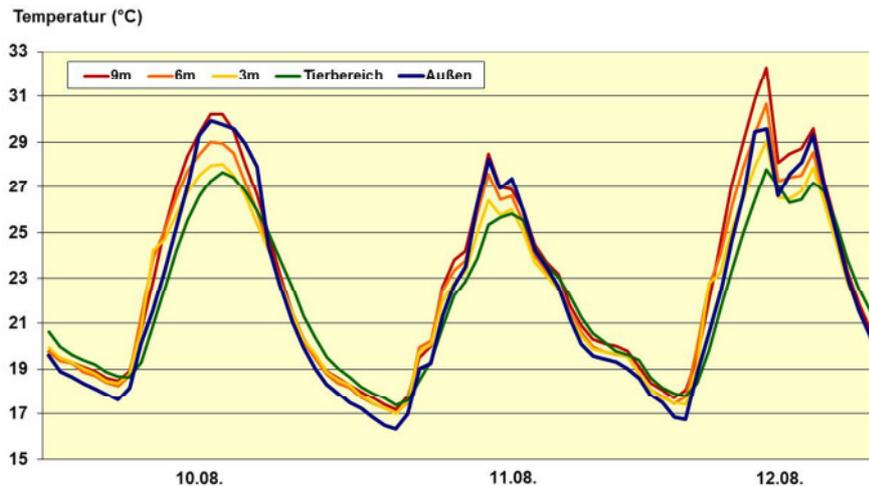
Seit mehreren Jahren werden in einem freigelüfteten Milchviehstall, bei dem es sich um einen in Praxis üblichen Leichtbaustall ohne Wärmedämmung des Daches handelt, umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, wobei ein Schwerpunkt Klimamessungen sind ( Abbildung 11).



**Abbildung 11: Außen- und Innenansicht des untersuchten Milchviehstalles**

So wurden u.a. die Temperaturen in vier verschiedenen Höhen über dem Stallfußboden (Tierbereich, 3 m, 6 m und 9 m) mittels Datenlogger kontinuierlich erfasst. Messungen mit einer Wärmebildkamera und Untersuchungen hinsichtlich Wärmestrahlung mit einem unidirektionalen Radiometer (UDRM) können zu folgenden Ergebnissen zusammengefasst werden:

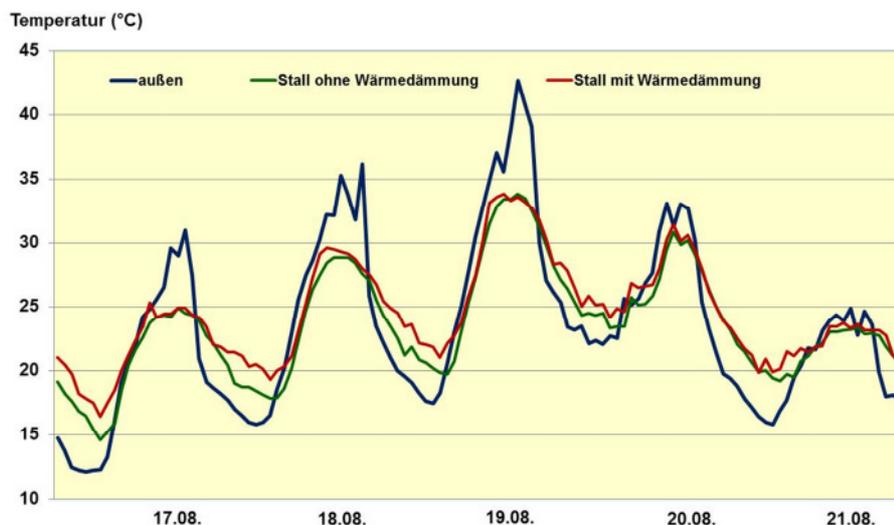
- An warmen Sommertagen kann ein Temperaturgradient von unten nach oben zum ungedämmten Dach hin festgestellt werden (Abbildung 12).
- Tagsüber erfolgt ein Wärmeeintrag durch das Dach.
- Ein Einfluss der Thermik durch aufsteigende Wärme im Stall ist nicht ersichtlich, da der Effekt des Temperaturgradientens nachts nicht erkennbar ist.
- Es konnte im Tierbereich keine Wärmestrahlung durch das ungedämmte Stalldach nachgewiesen werden.
- Erhöhte Oberflächentemperaturen durch die Sonneneinstrahlung führen nicht zwangsläufig zur Erhöhung der Umgebungstemperatur der Tiere.
- Auf Grund des großen Stallvolumens und eines hohen Luftwechsels kommt es im Tierbereich zu keinen nennenswerten Erhöhungen der Umgebungstemperatur, die auf das Dach zurückzuführen sind.



**Abbildung 12: Temperaturschichtung im untersuchten Stall an 3 Sommertagen mit dazugehöriger Anordnung der Messpunkte**

An einem anderen Standort, wo sich zwei vergleichbare frei belüftete Milchviehställe befinden, die sich aber durch die vorhandene bzw. nicht vorhandene Wärmedämmung des Daches unterscheiden, konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Mittels Wärmebildkamera wurden große Temperaturunterschiede der Dachinnenhaut beider Ställe festgestellt. Während bei Außentemperaturen von 23°C beim gedämmten Dach Oberflächentemperaturen von ca. 21°C gemessen wurden, wiesen große Teile des ungedämmten Daches Temperaturen von 36°C und mehr auf.
- Ebenso zeigten Untersuchungen mit dem UDRM bei Sonneneinstrahlung für die Wärmestrahlung vom Dach höhere Werte im ungedämmten Stall gegenüber dem gedämmten Stall.
- Ein Einfluss der Dachinnentemperatur auf die Temperaturen im Tierbereich konnte jedoch bisher nicht nachgewiesen werden (Abbildung 13).
- Allerdings scheint die Wärmedämmung einer Abkühlung des Stalles während der geringeren Nachttemperaturen entgegenzuwirken.



**Abbildung 13: Temperaturverlauf in einem Stall mit und einem ohne wärmege-  
dämmten Dach**

## 5.4.2 Einsatz von Sandwichelementen als Dacheindeckung als Maßnahme zur Vermeidung von Hitzestress im Milchkuhstall

*J. Menning*

Bei der Messung in einem neu errichteten Milchviehstall (Abbildung 14) mit Sandwichelementen als Dachhaut in Iden war das Ergebnis prinzipiell identisch zu den Erkenntnissen aus Dummerstorf. Im Rahmen der Versuchsanstellung wurden insgesamt 11 Sensoren im Stall verteilt. Da der Stall konsequent in Nord-Süd-Richtung gebaut ist, sollten auch mögliche Unterschiede zwischen der östlich bzw. nach Westen ausgerichteten Dachflächen erfasst werden. Sensoren für die Messung der Temperatur waren unter der Dachhaut sowie mit Abständen von 0,25, 0,50 und 1,0 m zur Dachhaut installiert. Außerdem wurden die Temperatur im Liegebereich sowie die Außentemperatur permanent gemessen. Ein Datenloggersystem sicherte die Messwerte im 45-Sekunden-Rhythmus.



Abbildung 14: Stallneubau mit Dacheindeckung aus Sandwichelementen

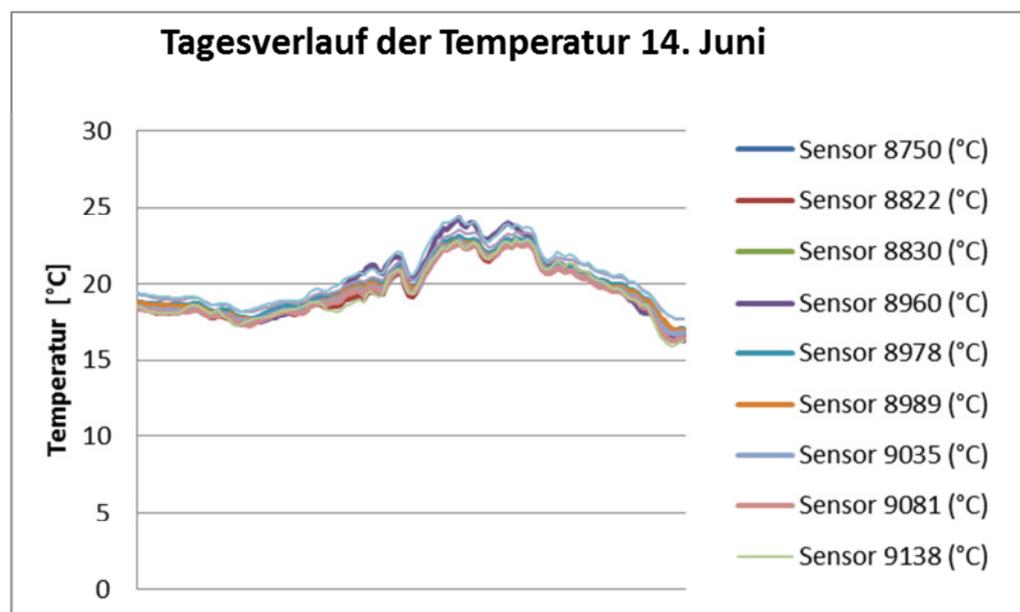


Abbildung 15: beispielhafte Tagesverläufe der Temperaturen an den Messstellen

Aus den Messwerten lassen sich folgende Aussagen ableiten.

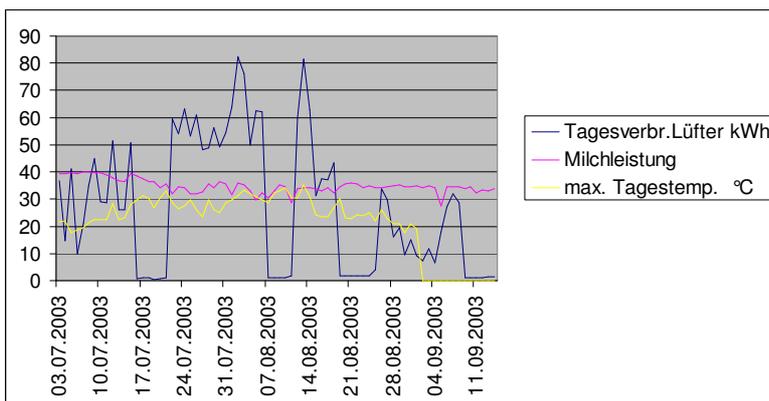
- Der Temperaturverlauf in einem frei belüfteten Stall entspricht dem der Außenlufttemperatur (Abbildung 15)
- Unmittelbar unter der Dacheindeckung waren signifikant höhere Temperaturen messbar, es muss also auch bei einer Kerndämmung der Dacheindeckung von einem Wärmedurchgang und damit von einer Wärmestrahlung ausgegangen werden
- Die Temperaturen im Stall (außer unmittelbar unter der Dacheindeckung) weichen nur unwesentlich voneinander ab
- Die Stalltemperatur lag 2 bis 4 K unter der Tagesaußentemperatur, Unterschiede zwischen Temperaturen der nach Osten bzw. Westen ausgerichteten Dachfläche sind nicht zu erkennen
- An der gedämmten Dachplatte war über den Beobachtungszeitraum von Sommer 2011 bis Frühjahr 2012 keine Kondensatbildung sichtbar.

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die Ausstattung moderner frei belüftete Ställe zukünftig vorzugsweise mit kerngedämmten Dachplatten erfolgen sollten. Es muss aber angemerkt werden, dass die Kosten dieser Platten erheblich über denen für ungedämmte Metall-dachplatten bzw. Wellfaserzementplatten liegen.

### 5.4.3 Einsatz von Ventilatoren zur Zusatzlüftung in Milchviehställen

*J. Menning*

Ein weiterer Aspekt im Zusammenhang mit der Konstruktion von Ställen mit freier Lüftung und der Auslegung des Daches ist die Sicherstellung der Funktionssicherheit der Stallklimagestaltung bei hohen Außentemperaturen. Neben den Maßnahmen zur Minderung von zusätzlichen Wärmeeinträgen in den Stall ist die Nutzung von Zusatzlüftungssystemen von zunehmender Bedeutung für die Praxis. Generell betrifft dies die Rinderhaltung, aber auch in Stallanlagen für die Geflügelhaltung wird hier verstärkt nachgefragt. Zu klären sind beim Einsatz von Ventilatoren zur Erzeugung einer künstlichen Luftbewegung im Stall die Form der Ventilatoren, die Richtung der Luftführung, die Verteilung der Lüfter im Stall sowie die Fragen der Kosten für Beschaffung und Betrieb.



**Abbildung 16: Beispielhafte Darstellung der Messergebnisse**

In Iden wurde in einem Stall für ca. 100 Milchkühe eine Zusatzlüftung installiert (Möller-Agrarklima) und bewertet. Die Ventilatoren sind dazu, basierend auf den Empfehlungen des Ausrüsters, im Stall eingebaut und mit einer temperaturbasierten Steuerung ausgestattet worden. Ab einer Rauminnentemperatur von 17°C wurden die Ventilatoren im Stall in Betrieb genommen und mittels einer frequenzgeregelten fünfstufigen Steuerung in der Förderleistung geregelt. Die Luftbewegung soll dann für einen Luftstrom am Tier

sorgen und die Körperwärme abführen. Zur Auswertung war eine Hitzestress bedingte Milchdepression von 2 Liter pro Tier und Tag unterstellt, die Messung begann im Mai und endete im Oktober, so dass eine hinreichende Sicherheit bezüglich der Betrachtung aller Tage mit einer Tageshöchsttemperatur über 17°C ausgegangen werden kann (Abbildung 16).

Im Ergebnis lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Durch eine entsprechend ausgelegte Zusatzlüftung lassen sich in einem Milchviehstall Kühlungseffekte für die Tiere erreichen.
- Die Zuschalttemperatur war mit 17°C Raumtemperatur akzeptabel.
- Mittels stromsparender Schaltungen (frequenzgeregelter Motoren mit einer Nennspannung von 230 V) lassen sich die Ventilatoren störungsfrei ansteuern.
- Der Verbrauch an elektrischer Energie über die Lüftungsperiode und eine Abschreibung von 8 Jahren für die Investition der Anlage wird durch eine verhinderte Milchleistungseinbuße von 2 l/ Tier + Tag deutlich kompensiert.
- Eine temperaturgeführte automatische Steuerung ist empfehlenswert, um Betriebskosten einzusparen.

#### 5.4.4 Belüftungskonzepte für Milchviehställe/ Einsatz von Ventilatoren

*T. Heidenreich, S. Pache*

Mit dem Thema Belüftungskonzepte für Milchviehställe hat sich das sächsische LfULG beschäftigt. Hintergrund war die Fragestellung, wie bestehende Milchviehställe ausreichend belüftet werden können bzw. welche Konzepte bei Neubauten zu berücksichtigen sind. In vielen Praxisbetrieben kommen Ventilatoren zum Einsatz, die bei Übersteigen der zulässigen Rauminnentemperaturen zugeschaltet werden und so durch die Luftbewegung eine Abkühlung der Tiere durch Verdunstungskälte erreicht wird. Die Anordnung der Ventilatoren oder Deckenlüfter im Stall und die daraus resultierenden Betriebskosten waren dabei in den Fokus gestellt.



Dazu wurden verschiedene Ventilatoren untersucht (Abbildung 17). Die Unterscheidung erfolgte sowohl in der Bauart wie auch in technischen Normen wie Durchmesser, Motorspannung oder Fördermenge. Außerdem wurden Varianten der Zuordnung der Ventilatoren zueinander und

**Abbildung 17: Im Versuch betrachtete Ventilatoren**

die Verteilung im Stall untersucht.

Die Ergebnisse der umfangreichen Untersuchungen waren außerordentlich vielschichtig. Kernaussage ist aber, dass keine Standardlösung angeboten werden kann sondern insbesondere für bestehende Stallanlagen jeweils eine Analyse der Vor-Ort-Situation erforderlich ist. In einigen Punkten lassen sich aber Grundaussagen machen.

- In einem frei belüfteten Stall für die Rinder-/ Milchviehhaltung kann man unter bestimmten Umweltbedingungen für hochleistende Tiere auf Zusatzlüftung nicht verzichten, ohne Leistungseinbußen hinnehmen zu müssen.
- Hitzestress hat nicht nur Einfluss auf die Futteraufnahme und damit auf die Milchleistung sondern auch auf die Trächtigkeit der Tiere.
- Die Anordnung der Ventilatoren im Stall ist durchaus variabel gestaltbar.

- des Gebäudes, der Lage zur Wohnbebauung, Biotopen oder anderen Schutzgütern.
- Die Kosten für den Einsatz der Ventilatoren rentieren sich durch die Vermeidung von Hitzestress und Trächtigkeitsproblemen im Sommer.

Besonderes Augenmerk wurde im Zuge der Versuchsreihen auch auf den Kostenvergleich beim Einsatz verschiedener in der Praxis zu findender Ventilatorentypen gelegt. Hieraus konnten Empfehlungen zu Einsatzkriterien und den anzusetzenden Kosten pro Tierplatz oder den Jahreskosten für die Praxis bereitgestellt werden.

#### 5.4.5 Einfluss der Dachkonstruktion auf die Thermoregulation von Milchkühen

*T. Heidenreich, S. Pache*

Im Versuchsstall des LVG Köllitsch sind im laufenden Betrieb Messungen mit dem Globalthermometer und einer Infrarotkamera/ Wärmebildkamera durchgeführt worden. Hintergrund für diese Messreihen war die Frage, wie sich der Wärmedurchgang und die Wärmestrahlung der Dacheindeckung auf das Stallklima, und hier besonders die Raumtemperatur auswirken. Besonders hochleistende Milchrinder haben bei hohen Umgebungstemperaturen Probleme, die



durch den Stoffwechsel entstehende Wärmeenergie des Körpers an die Umgebung abzugeben. Diese Belastung führt zu Stress für die Tiere, in dessen Ergebnis die vom Tier abgegebene Milchmenge sinkt und damit ein letztlich ökonomischer Schaden für den Tierhalter entsteht. Die Praxis reagiert darauf durch den Bau von großvolumigen Stallbauten oder den Einsatz von Ventilatoren zur. Die Versuchsanstellung sollte nun klären, ob durch Wellfaserzementedeckungen unterschiedlicher Oberflächenfarbe eventuell ein Unterschied bei der Strahlungswärme nachgewiesen werden kann

**Abbildung 18: Beispiel für Messergebnisse**

und daraus eine Empfehlung abzuleiten ist, wie eine zusätzliche Wärmebelastung für die Tiere vermieden werden kann. Neben der Messung mit Infrarotkamera wurde auch ein Globalthermometer zum Einsatz gebracht.

Die Messungen haben gezeigt, dass grundsätzlich mit Strahlungswärme zu rechnen ist (Abbildung 18).

Im Ergebnis der Versuchsreihen lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Eine vollständige Vermeidung von Wärmestrahlung lässt sich auch mit einer Wellfaserzementplatte nicht vermeiden.
- Die Wärmestrahlung ist aber eindeutig geringer als bei Eideckungen aus metallischen Materialien.
- Die Farbwahl hat großen Einfluss auf die Strahlungswärme, wobei aus Sicht der Stallklimagegestaltung die helle, lichtgraue Farbgebung zu bevorzugen ist.

Neben den Ergebnissen zur Farbwahl bei Wellfaserzementplatten für frei belüftete Ställe konnte im Rahmen der Versuchsanstellung auch der Einfluss von Lichtplatten bzw. Lichtbahnen im Stalldach mit bewertet werden. In der Praxis war es in den letzten 15 Jahren Standard, zur Ver-

besserung der Beleuchtung von Ställen mit natürlichem Licht in die Dachfläche gleichmäßig verteilte Lichtplatten aus Kunststoff einzusetzen bzw. ganze Bahnen vom First bis zur Traufe aus lichtdurchlässigen oder durchscheinenden Kunststoffplatten zu empfehlen. Bezüglich der Belichtung war diese Empfehlung nachvollziehbar und korrekt. Auch war durch das Material keine Wärmestrahlung der Flächen zu befürchten, da diese kaum Wärmespeichervermögen aufweisen. Negativ hat sich aber die Belastung der Tiere bei direkter Sonneneinstrahlung durch die Lichtplatten ausgewirkt. Liegeboxen oder Stallbereiche werden von den Tieren gemieden, die im Tagesgang direkter Bestrahlung durch die Sonne ausgesetzt waren. Insbesondere Tiere mit dunkler Fellfärbung werden durch die direkte Sonneneinstrahlung einer hohen Wärmebelastung ausgesetzt, die besonders bei hohen Umgebungstemperaturen zu einem zusätzlichen Stressfaktor wird.



**Abbildung 19: Empfohlene Anordnung von Lichtplatten (links) und ungünstige Anordnung (rechts)**

Im Ergebnis lässt sich die Aussage treffen, dass bei Stallneubauten auf den flächigen Einsatz von Lichtelementen im Dach verzichtet werden sollte (Abbildung 19). Vielmehr ist eine hinreichend große Firstöffnung mit einer geeigneten lichtdurchlässigen Firstüberdeckung oder ein versetzter First sowie lichtdurchlässiges Wandmaterial wie z.B. durch Wickellüftungen aus Gewebeplane für die natürliche Belichtung vorzuziehen

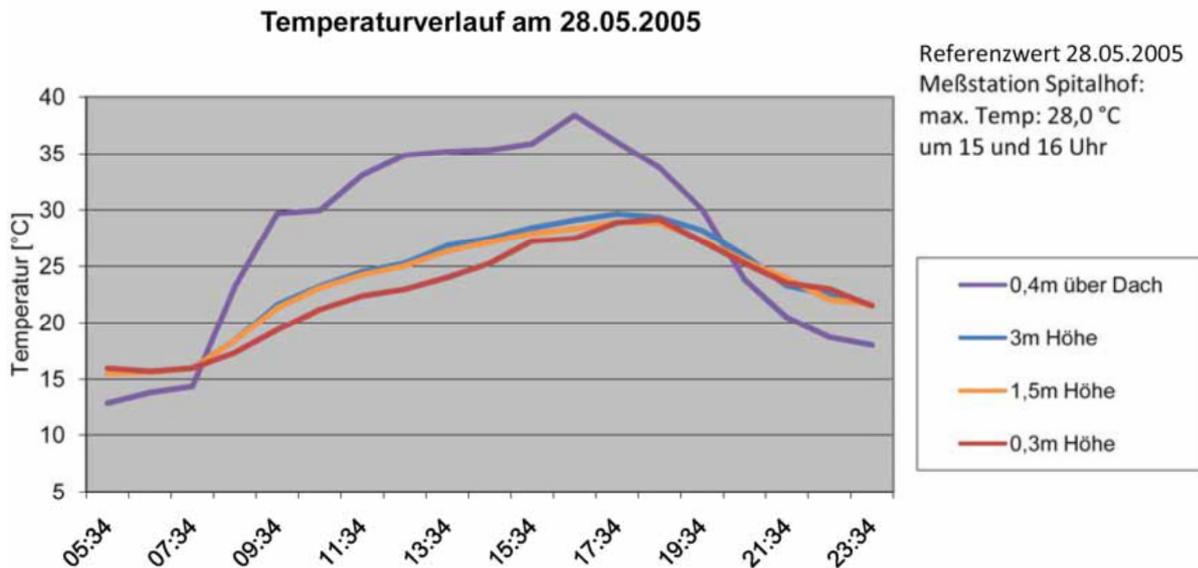
#### **5.4.6 Einfluss der Bauweise von Milchviehställen in ein- oder mehrhausige Lösungen auf das Stallklima**

*J. Simon et.al.*

An der LfL Bayern wurden die bisherigen standardisierten Baulösungen für Milchviehställe in Form großer Hallen mit hohen Trauf- und Firstmaßen hinterfragt und mit alternativen Baulösungen verglichen. Dabei hat sich das Team um die Frage gekümmert, wie sich z.B. mehrhausige Stallanlagen mit unterschiedlichen Funktionen und Bauweisen bezüglich der Baukosten und der Stallklimagestaltung darstellen. Basis der Bewertung stellten tatsächlich realisierte Bauvorhaben dar. Dabei kam zum Ausdruck, dass bereits die Gestaltung eines Stalles und die Auswahl der Baustoffe erheblich zur Baukostenentwicklung beitragen und einen wesentlichen Einfluss auf die Stallklimagestaltung haben. So bieten mehrhausige Konzepte, in denen der Liegebereich, das Füttern und das Melken in jeweils eigenständigen, sinnvoll zueinander angeordneten Bauten Vorteile hinsichtlich der Baukosten und der Durchlüftung bieten.

Ein weiterer Aspekt war die Frage nach der Bauausführung des Daches. Neben den Varianten einer Trapezblecheindeckung bzw. der Nutzung von Wellfaserzementplatten war auch ein begrüntes Flachdach in die Betrachtung einbezogen worden. Diese für Stallbauten sicher bisher eher ungewöhnliche Bauausführung hat sich bei hohen Umgebungstemperaturen sehr positiv gezeigt. So konnten die bayrischen Kollegen bei einer Messung im Mai und Außentemperaturen über 35 °C (bei direkter Sonneneinstrahlung 0,40 m über dem Dach) deutlich geringere Raumtemperaturen ( $\Delta t_{\max}=10$  K) festgehalten werden (siehe auch Abbildung 20). Eine zusätzliche Wärmestrahlungsbelastung ist mit einem begrüntem Dach also nicht zu erwarten. Im Er-

gebnis wird festgestellt, dass diese Ausführung der Dachkonstruktion für die Standardlösung im Stallbau für Milchkühe nicht geeignet ist, da die Dachneigung bei Freier Lüftung zwingend einzuhalten ist.



**Abbildung 20: Temperaturverlauf begrüntes Dach**

Allerdings bietet sich ein begrüntes Dach im Zusammenhang mit einer mehrhausigen Stallgestaltung als bisher nicht beachteten alternativen Lösungsansatz an. In einer Präsentation der LfL Bayern (siehe Abbildung 21, nächste Seite) sind die gestalterischen Grundsätze, die praktische Umsetzung sowie Angaben zu den Baukosten veröffentlicht worden.

Im durch die LfL begleitenden Projekt wurde ein Flachdach begrünt, ein Verfahren, dass im Baubereich bereits in vielfältiger Form zu finden ist.

Schon 2006 hat man an der FAL Braunschweig einen Milchviehstall mit Steildach ( $>10^\circ$ ) mit einem Sumpfpflanzenbelag begrünt (Quelle: gfw-Wasser/ Abwasser Juni 2010). Anders als bei der klassischen Dachbegrünung wird bei dem Sumpfpflanzendach die Begrünung mittels einer eigens entwickelten Stoffbahn als Trägerschicht aufgebaut. Um die Sumpfpflanzen optimal zu entwickeln, muss in regelmäßigem Rhythmus bewässert werden. Die Ergebnisse der Versuche hierzu sind veröffentlicht und vorgestellt worden im Rahmen der 8. Tagung Bau, Technik, Umwelt 2007 in Bonn.

**Ein kleiner Laufstall im Ökomilchviehbetrieb**

Jochen Simon, Waltraud und Konrad Zeiler, Stefan Bauer & Peter Stötzel



Luftbild Hofanlage vor dem Stallbau

Betriebsform	Nebenerwerb
Flächen	14,0 ha Wasser 6,0 ha Ackerland
Tierbestand	26 Milchkühe mit eigener Nachzucht
Milchleistung	Ø 6.500 l
Umweltung	seit Mai 2006 (Naturland)
Arbeitskräfte	1,5 Az



Tragwerk

Plätze Milchvieh	26
Plätze Jungvieh	21
Abmessungen	27,0 m x 34,0 m
Firsthöhe	ca. 5,10 m
Gesamtfläche	930 m <sup>2</sup>
Fläche pro Tierplatz	Milchvieh 13,1 m <sup>2</sup> /TP Jungvieh 9,8 m <sup>2</sup> /TP
Überdachte Fläche	Milchvieh 11,2 m <sup>2</sup> /TP Jungvieh 6,6 m <sup>2</sup> /TP
Nicht überdachte Fläche	Milchvieh 1,9 m <sup>2</sup> /TP Jungvieh 3,0 m <sup>2</sup> /TP
Freisplatz-Tierverhältnis	1:1



Dachdetail

Unterbau	10.000 €
Rohtbau	61.400 €
Zimmerarbeiten	28.800 €
Dachabdichtung	16.100 €
Stalleinrichtung	17.900 €
Entlüftung	15.200 €
Melstechnik	12.300 €
Technik (Elektr., Wasser)	20.500 €
Standortbedingte Mehrkosten (Unterbau 70%, Rohtbau 10%)	-13.100 €
Gesamt	160.900 €
Je Tierplatz	6.188 €
Güllelager	21.000 €
Nebenkosten	1.200 €
Eigenleistung	ca. 1.800 Std.

Betriebsziele:  
W. & K. Zeiler

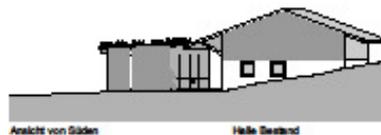
Kernwerte  
Gebäude

Investitionsbedarf



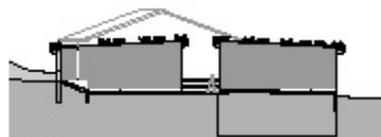
Ansicht von Westen

Halle Bestand



Ansicht von Süden

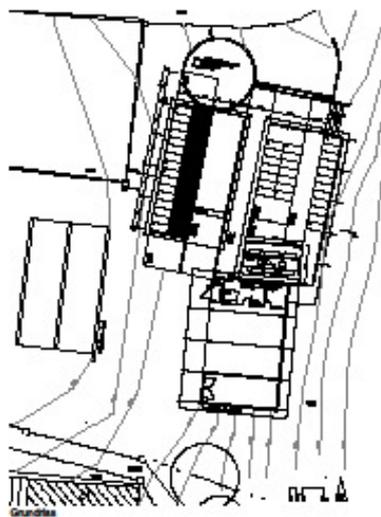
Halle Bestand



Ansicht von Norden



Schnitt A - A



Grundriss

**Zielstellung:**

- Realisierung eines kleinen Milchviehstalls gem. VO EG 889/2008 (EG-Öko-Verordnung)
- Integration der nicht überdachten Auslaufflächen in die Stallanlage
- Standortanpassung bzgl. verfügbarer Flächen, Emissionen und Gelände
- Schaffung eines optimalen Stallklimas durch schmale Baukörper, große Wand-/ Dachöffnungen und Dachbegrünung (sommerlicher Wärmeschutz)

**Kosteneinsparpotenziale:**

- Kostengünstige mehrhausige Bauweise
- Teilumnutzung der Maschinenhalle
- Gebrauchte Melstechnik
- Eigenleistung



Ansicht von Westen



Ansicht von Osten



Ansicht von Nord-Osten

Abbildung 21: Veröffentlichung der LfL zur Dachbegrünung

## 5.5 Fazit

Den Einfluss der Dachgestaltung, sowohl in der Bauart, der Dachfarbe oder Dachgestaltung auf das Stallklima ist eindeutig gegeben und lässt sich dank vieler Ergebnisse unterschiedlicher Versuchsanstellungen klar belegen. Die Nutzung dieser Erkenntnisse hat seinen Weg in die Praxis klar gefunden. Dass es trotzdem immer wieder Punkte zur Verbesserung einzelner Details gibt, was sich beispielhaft an der Frage nach der Einordnung von Lichtplatten im Milchviehstall zeigt, wird die Forschung und Praxis auch weiter beschäftigen und fordern. Offen dargestellt werden muss aber auch der Fakt, dass die Stallklimagestaltung in einem Stall mit freier Lüftung außerordentlich multifaktoriell beeinflusst wird. Bereits die Anordnung der Standausrüstungen, die Abmessungen der Gebäude, die Ausrichtung und die Topografie oder die Jahreszeit bewirken unterschiedlichste Reaktionen der Stallklimaeinflussfaktoren im Stall. Oder aber auch gesetzliche Rahmenvorgaben wie Flächen pro Tierplatz, gestalterische Vorgaben zu Funktionsbereichen oder der technische Fortschritt haben Einfluss auf das Stallklima. Es kann also mit Bestimmtheit davon ausgegangen werden, dass die aktuellen Erkenntnisse lediglich eine Momentaufnahme darstellen und auch künftig Innovationen in den Stallbau zur Verbesserung des Stallklimas und damit des Tierwohles Einzug halten werden. Die Neuerungen zu kennen, deren Wirkungsweise zu hinterfragen und die Wertung hinsichtlich einer Verbesserung für die Praxis vorzunehmen wird Aufgabe und Anspruch der beteiligten Einrichtungen bleiben!

## 5.6 Literatur

BAYRISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT: Ein kleiner Laufstall im Ökomilchviehbetrieb. Poster

BLUMBERG, M.: Sumpfpflanzendächer als Variante der Dachbegrünung

DACHDECKERFORUM, Internet

GFW-WASSER/ ABWASSER Juni 2010

8. Tagung Bau, Technik, Umwelt 2007 in Bonn (Verminderung der Hitzebelastung in einem Milchviehstall durch ein Sumpfpflanzendach).

Haidn, B.; Heidenreich, T.; Simon, J. (2008): Hitzestress im Milchviehstall. Tagungsband, Grub

Heidenreich, T.: Belüftungskonzepte für Hochleistungskühe. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

## 6 Möglichkeiten der Messung von Methan- bzw. Stickstoffausscheidungen in der Rinderproduktion über Hilfsparameter aus der Milch, der Fütterung sowie weiterer Quellen

*P. Sanftleben*

### 6.1 Einführung

Es gibt ein zunehmendes Interesse an einer Reduzierung der potentiellen Bedrohung einer Erderwärmung durch die Verminderung der Emissionen von Treibhausgasen (THG) in die Atmosphäre (MOSS ET AL. 2000). Landwirtschaftliche Aktivitäten können in nicht unerheblichem Maße zu globalen THG-Ausscheidungen beitragen, dazu gehören Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Stickoxide (N<sub>2</sub>O) und Ammoniak (NH<sub>3</sub>) als wichtigste THG (IPCC 2001). Die weltweite Freisetzung von CH<sub>4</sub> aus landwirtschaftlichen Quellen beträgt zwei Drittel der anthropogenen Methanquellen (IPCC 2007). Die Freisetzung von Methan in die Atmosphäre ist direkt mit der Domestikation von Tieren vor 5.000 Jahren verbunden (RUDDIMAN 2003). Weltweit sind die Wiederkäuer für etwa 85 Tg (1 Tg = 10<sup>12</sup> g = 1 Million metrische Tonnen) der 550 Tg Methan verantwortlich, die jährlich freigesetzt werden (MCGINN ET AL. 2006).

### 6.2 Schätzung von Methanemissionen

Die Messung von Methanausscheidungen bei Tieren erfordert eine komplexe und oftmals teure Ausrüstung. Daher gibt es eine Reihe von Schätzgleichungen, die dafür genutzt werden (SEJIAN ET AL. 2011). Einige Modelle sind entwickelt worden, um spezifisch die Methanemissionen von Tieren zu schätzen (ELLIS ET AL. 2007), andere wurden modifiziert oder angepasst, um die Emission aus der Pansenfermentation zu schätzen (DIJKSTRA ET AL. 1992). Gegenwärtig werden mathematische Modelle verwendet, die über die Fermentation die CH<sub>4</sub>-Emission auf nationaler und weltweiter Ebene abschätzen. Dafür hat das IPCC (2006) Richtlinien veröffentlicht, um zu relativ einheitlichen Vorgehensweisen zu kommen. Die Genauigkeit dieser Prozedur ist allerdings nicht unumstritten (KEBREAB ET AL. 2006). Das liegt auch daran, dass die Vormafermentation von einer Vielzahl an Einflussfaktoren beeinträchtigt wird (Tabelle 10).

In den meisten veröffentlichten Schätzungen nationaler Anfallmengen an Methan wird sich auf die Emissionsfaktoren bezogen, die für jede Art von Nutztier vom IPCC (2006) veröffentlicht wurden. Diese wiederum beruhen auf einer Schätzgleichung von BLAXTER und CLAPPERTON (1965), die die Beziehung zwischen Methanproduktion, Futteraufnahme und Verdaulichkeit berücksichtigt:

$$CH_4 (\% \text{ der Bruttoenergieaufnahme}) = 1,3 + 0,112 D + L (2,37 - 0,05 D)$$

mit D = Trockenmasseverdaulichkeit und L = Niveau der Futteraufnahme. Diese Gleichung wurde an Versuchen mit Schafen in Respirationkammern ermittelt und passt sehr gut zu Futtertypen und Fütterungsniveaus, an denen sie abgeleitet wurde. Diese Gleichung schätzt die Emissionsverluste in einer Größenordnung zwischen 5 und 8 % der Bruttoenergieaufnahme. Die beobachteten Methanemissionen bei einer Vielzahl an Rationen und Tierarten variierten jedoch zwischen 2 und 12 % der Bruttoenergieaufnahme (JOHNSON und JOHNSON, 1995). Diese Autoren ermittelten nur eine Beziehung zwischen geschätzter und beobachteter CH<sub>4</sub>-Emission von r<sup>2</sup>=0,23. MOSS et al. (2000) unterstrichen, dass die Fermentationsrate stark variieren kann, und zwar in Abhängigkeit von Faktoren wie Tierart, Menge und Art des Futters, Umwelt, zusätzlicher Gabe von Fett, Futterzusätzen und Körpermasse des Tieres. KEBREAB ET AL. (2008) untersuchen verschiedene Gleichungen zur Schätzung der Methanemissionen des US-amerikanischen Rinderbestands. Sie kommen zu dem Schluss, dass es grundsätzlich zwei Typen von Modellen gibt. Empirische (statistische) Modelle setzen die Nährstoffaufnahme direkt ins Verhältnis mit der Methanausscheidung, und dynamische mechanistische Modelle versuchen die Methanemission auf der Basis mathematischer Beschreibungen der Biochemie

der Pansenfermentation zu simulieren. KEBREAB ET AL. (2008) konnten zeigen, dass mechanistische Modelle auf der Basis rationspezifischer Daten genauer sind, um den Anfall von Methan für bestimmte Tierbestände zu schätzen.

**Tabelle 10: Einflussfaktoren auf die Methanausscheidung über Fermentationsvorgänge im Vormagen (nach SEJIAN ET AL. 2011)**

<b>Tierfaktoren</b>	Tierart
	Rasse
	Milchleistung
<b>Fütterungsfaktoren</b>	Rationszusammensetzung
	Anteil an Grundfutter
	Krafftutterart
	Menge an verdaulichen Nährstoffen
	Fütterungsstrategie
	Trockenmasseaufnahme
<b>Vormagensystem</b>	Art und Population der Pansenmikroben
	pH-Wert der Pansenflüssigkeit
	Acetat-Propionat-Verhältnis
<b>Umweltfaktoren</b>	Managementpraktiken
	Umweltstress

In der Literatur sind verschiedene Methoden der CH<sub>4</sub>-Messung bei Tieren beschrieben. Diese beinhalten die Nutzung von Respirationskammern (MURRAY ET AL. 1999), Isotopentechniken (FRANCE ET AL. 1993), Spurengastechniken [SF<sub>6</sub>] (JOHNSON ET AL. 1994) und Mengenanalysen/mikrometeorologische Techniken (HARPER ET AL. 1999). Vor- und Nachteile wurden von JOHNSON und JOHNSON (1995) reviewed. Die meisten Gleichungen zur Schätzung von CH<sub>4</sub>-Emissionen wurden von Daten aus Respirationskammern abgeleitet, um die Beziehung zwischen Energieaufnahme und CH<sub>4</sub>-Produktion zu definieren. Sie beruhen in der Regel auf Rationscharakteristiken. Die Umgebung innerhalb der Respirationskammer ist kontrolliert und die Tiere werden während der Messung restriktiv versorgt. Deshalb können diese Daten nicht auf jede Betriebssituation übertragen werden, besonders wenn Tiere weiden und die Weidequalität sich ändert (BOADI et al. 2004). Dynamische bzw. mechanistische Modelle zur Schätzung der Methanausscheidung von Wiederkäuern wurden ebenfalls etabliert, um die ruminale Fermentation unter einer Vielzahl von Fütterungsbedingungen zu simulieren (BENCHAAR ET AL. 1998, MILLS ET AL. 2001). BENCHAAR ET AL. (1998) zeigten, dass mechanistische Modelle die Schätzung der Methanproduktion genauer ermöglichten als einfache Regressionen, und das unter Einbeziehung einer großen Variation von Rationstypen. Die Regressionsanalyse ergab eine gute Übereinstimmung zwischen beobachteten und geschätzten Ergebnissen, wenn die experimentellen Daten aus der Literatur für die Modellierung verwendet wurden ( $r^2=0,76$ , mittlerer Schätzfehler = 15.4 %; MILLS ET AL. 2001). Obwohl diese Modelle sich als hilfreich bei der Schätzung der der CH<sub>4</sub>-Produktion von Tieren unter den Bedingungen erwiesen, unter denen die Gleichungen oder Modelle entwickelt wurden, gibt es Begrenzungen bei der Schätzung unter Bedingungen, wo die Aufnahme nicht bekannt ist oder der Pansen beeinflusst wird. ELLIS ET AL. (2010) verglichen neun verschiedene Schätzgleichungen zur Ermittlung der Methanausscheidungen von Milchkühen auf Betriebsbasis. Allgemein war die Genauigkeit nur gering. Es zeigte sich, dass mehr allgemeine Gleichungen schlechter schätzten als Gleichungen, die ver-

suchten, wichtige Aspekte der Rationszusammensetzung zu berücksichtigen. Als geeignete Modelle wurden die Gleichungen von IPCC (2006), MOE und TYRRELL (1979) sowie KIRCH-GESSNER ET AL. (1995) erwähnt.

### 6.3 Angaben zu CH<sub>4</sub>-Emissionsfaktoren für Rinder

In der Literatur finden sich Angaben zu Methanemissionsfaktoren für Rinder, die aufgrund von Schätzungen ermittelt wurden. Aufgrund der Angaben des IPCC (2006) kalkulierten BOADI ET AL. (2004) folgende Werte für Kanada (Tabelle 11).

**Tabelle 11: Kanadische Rinder-Methan-Emissionsfaktoren (nach BOADI ET AL. 2004)**

Kategorie	Liter CH <sub>4</sub> je Tag	kg CH <sub>4</sub> je Jahr
Bullen	288	75
Milchkühe	453	118
Fleischrindkühe	276	72
Milchrindfärsen	215	56
Fleischrindfärsen	215	56
Schlachtfärsen	180	47
Ochsen	180	47
Kälber	180	47

CHASE (2008) teilte Methan-Emissionen für US-Milchkühe in Abhängigkeit von der Milchleistung mit und verdeutlichte, dass mit steigender Leistung zwar die Methanausscheidung absolut zunimmt, je kg erzeugter Milch aber geringer wird (Tabelle 12).

**Tabelle 12: Milchproduktion und Methanemission von Milchkühen (nach CHASE 2008)**

Milch (kg/d)	Trockenmasseaufnahme (kg/d)	Methan (Mcal/d)	Methan (l/d)	Mcal Methan/kg Milch	l Methan/kg Milch
20,0	16,8	4,75	518	0,24	26,0
29,9	19,5	5,31	580	0,18	19,4
39,9	23,6	5,97	652	0,15	16,3
49,9	28,1	6,64	725	0,13	14,6
59,9	33,1	7,26	793	0,12	13,2

### 6.4 Beispiele für Schätzgleichungen und Genauigkeit der Schätzungen

ELLIS ET AL. (2007) versuchten, vorhandene Schätzgleichungen für die CH<sub>4</sub>-Ausscheidungen zu prüfen bzw. zu verbessern. Zielrichtung war dabei die Ableitung von Minimierungsstrategien. Sie konnten 83 Fleischrind- und 89 Milchrind-Datensets sammeln und nutzten diese zur Entwicklung eigener statistischer Modelle. Dafür wurden die Trockenmasseaufnahme, die Aufnah-

me an verdaulicher Energie, NDF, ADF, Etherextrakt, Lignin und Grundfutteranteil berücksichtigt. Sie ermittelten, dass nur zwei der neun vorhandenen Formeln die Methanausscheidung angepasst schätzten (Tabelle 13). Die neu entwickelten Modelle auf der Basis allgemeiner bestimmbarer Werte brachten dagegen eine Verbesserung in der Schätzgenauigkeit. Für Fleischrinder erwies sich folgende Formel als am besten geeignet:

$$CH_4 \text{ (MJ/d)} = 2,94 (\pm 1,16) + 0,059 (\pm 0,0201) \times \text{verdauliche Energieaufnahme (MJ/d)} + 1,44 (\pm 0,331) \times \text{ADF (kg/d)} - 4,16 (\pm 1,93) \times \text{Lignin (kg/d)}$$

*(Mittlerer Standardfehler 14,4 %)*

Im Milchrindbereich wurde folgende Gleichung mit dem kleinsten Fehler ermittelt:

$$CH_4 \text{ (MJ/d)} = 8,56 (\pm 2,63) + 0,14 (\pm 0,056) \times \text{Grundfutter (\%)}$$

*(Mittlerer Standardfehler 20,6 %)*

Auch die Gleichung mit der Nutzung der Trockenmasseaufnahme brachte eine gute Genauigkeit für den Milchrindbereich:

$$CH_4 \text{ (MJ/d)} = 3,23 (\pm 1,12) + 0,81 (\pm 0,086) \times \text{Trockenmasseaufnahme (kg/d)}$$

*(Mittlerer Standardfehler 25,6 %)*

Diese Gleichungen beziehen sich auf nordamerikanische Rindergenetik und typische nordamerikanische Rationen. Die Autoren schätzen die neu entwickelten Modelle mit der Nutzung weniger, einfacher Eingabevariablen als Möglichkeit einer relativ exakten Methanproduktionsschätzung ein. Die Schwierigkeit bei der Anwendung existenter Modelle liegt in der Verfügbarkeit der notwendigen Eingabedaten.

Eine gute Vorhersage der Methanemission erlaubt eine von JENTSCH ET AL. (2007) entwickelte Regressionsgleichung auf der Basis von Daten aus 337 Respiationsversuchen mit verschiedenen Rindern (Ochsen, Jungbullen, laktierende und nicht-laktierende Kühe, Jungkühe). Diese berücksichtigt den Gehalt an verdaulichen Nährstoffen:

$$CH_4 \text{ (kJ/d)} = 1,62 \times \text{vRP (g)} - 0,38 \times \text{vRFe (g)} + 3,78 \times \text{vRFa (g)} + 1,49 \times \text{vNFE (g)} + 1.142$$

*( $r^2 = 0,896$ )*

Die N-Ausscheidung ermittelten BRACHER ET AL. (2011) über Parameter aus der Milch. Der Milchwahnharnstoffgehalt ist ein einfach zu bestimmender Parameter. Die Autoren leiten aus ihren Untersuchungen einen optimalen Rohproteingehalt der Ration von <18 % und ein Rohprotein/NEL-Verhältnis von <25 g/MJ ab, damit eine größtmögliche Umwelteffizienz erreicht wird. Der Milchwahnharnstoffgehalt sollte unter 25 mg/dl betragen.

$$\text{N-Ausscheidung (g/d)} = 147,57e^{0,0257 \times \text{Milchwahnharnstoffgehalt (mg/dl)}} \quad (R^2=0,5577)$$

$$\text{Harn-N-Ausscheidung (g/d)} = 40,724e^{0,047 \times \text{Milchwahnharnstoffgehalt (mg/dl)}} \quad (R^2=0,668)$$

SPIEKERS ET AL. (2008) beschreiben in einer Arbeit der DLG die Kalkulation der N-Ausscheidung mit Kot und Harn. Basis sollen der Milchwahnharnstoffgehalt und die Milchmenge der Kühe sein, um die N-Ausscheidung abzuschätzen. Dies geht auf eine Berechnung von BAN-NINK und HINDLE (2003) zurück. SPIEKERS ET AL. (2008) konstatieren, dass eine hinreichende Genauigkeit besteht, um ein einzelbetriebliches Controlling zu ermöglichen.

$$\text{N-Ausscheidung je Kuh und Tag (g)} = 124 + (1.320 \times \text{Milchwahnharnstoff-N [g N/kg Milch]}) + (1,87 \times \text{Milch-N [g N/Tag]}) - (6,90 \times \text{Milchmenge [kg/Tag]}) \text{ mit } r^2=0,80 \text{ und } RSD = 43 \text{ g/Tag}$$

$$\text{Milchwahnharnstoff-N} = 46 \% \text{ vom Milchwahnharnstoff; Milch-N} = \text{kg Milch} \times (\text{g Milcheiweißgehalt} : 6,3)$$

Die Gülle-N-Ausscheidung kalkulierten KIRCHGESSNER ET AL. (1991) mit folgender Formel:

$$\text{Gülle-N-Ausscheidung (kg /Tier und Jahr)} = 61 + (\text{Jahresmilchleistung in kg/Tier und Jahr} + 550) \times (1,65 \times \text{RP in \% in TM} - 20,5)/1.000$$

**Tabelle 13: Übersicht über publizierte Gleichungen zur Schätzung der Methanausscheidung von Fleischrindern und Milchkühen sowie mittlere Standardfehler der Modelle (nach ELLIS ET AL. 2007)**

Quelle	Gleichung	Mittlerer Standardfehler (%)	R <sup>2</sup>
KRISS (1930)	$CH_4 \text{ (MJ/d)} = 75,42 + 94,28 \times \text{Trockenmasseaufnahme (kg/d)} \times 0,05524 \text{ (MJ/g } CH_4)$	39,9 (Fleischrind) 31,3 (Milchrind)	0,44 (FR) 0,65 (MR)
AXELSSON (1949)	$CH_4 \text{ (MJ/d)} = -2,07 + 2,636 \times \text{Trockenmasseaufnahme (kg/d)} - 0,105 \times \text{Trockenmasseaufnahme (kg/d)}^2$	37,8 (Fleischrind) 40,4 (Milchrind)	0,46 (FR) 0,24 (MR)
BLAXTER und CLAPPERTON (1965)	$CH_4 \text{ (MJ/d)} = 5,447 + 0,469 \times (\text{Energieverdaulichkeit bei Erhaltungsbedarf, \% der Bruttoenergie}) + \text{Vielfaches der Erhaltung} \times [9,930 - 0,21 \times (\text{Energieverdaulichkeit bei Erhaltungsbedarf, \% der Bruttoenergie})/100 \times \text{Bruttoenergieaufnahme, MJ/d}]$	19,1 (Fleischrind) 29,1 (Milchrind)	0,67 (FR) 0,51 (MR)
MOE und TYRRELL (1979)	$CH_4 \text{ (MJ/d)} = 3,41 + 0,511 \times \text{Nichtfaserkohlenhydrate (kg/d)} + 1,74 \times \text{Hemicellulose (kg/d)} + 2,652 \times \text{Cellulose (kg/d)}$	41,6 (Fleischrind) 50,8 (Milchrind)	0,14 (FR) 0,24 (MR)
MILLS ET AL. (2003)	A: $CH_4 \text{ (MJ/d)} = 5,93 + 0,92 \times \text{Trockenmasseaufnahme (kg/d)}$	55,5 (Fleischrind) 33,5 (Milchrind)	0,44 (FR) 0,65 (MR)
	B: $CH_4 \text{ (MJ/d)} = 8,25 + 0,07 \times \text{Aufnahme an verdaulicher Energie (MJ/d)}$	53,8 (Fleischrind) 37,0 (Milchrind)	0,36 (FR) 0,53 (MR)
	C: $CH_4 \text{ (MJ/d)} = 1,06 + 10,27 \times \text{Grundfutteranteil} + 0,87 \times \text{Trockenmasseaufnahme (kg/d)}$	86,3 (Fleischrind) 43,3 (Milchrind)	0,52 (FR) 0,54 (MR)
	D: $CH_4 \text{ (MJ/d)} = 56,27 - (56,27 + 0) \times e^{-0,028 \times \text{TS-Aufnahme (kg/d)}}$	41,1 (Fleischrind) 28,9 (Milchrind)	0,45 (FR) 0,66 (MR)
	E: $CH_4 \text{ (MJ/d)} = 45,89 - (45,89 + 0) \times e^{-0,003 \times \text{ME-Aufnahme (MJ/d)}}$	28,7 (Fleischrind) 28,7 (Milchrind)	0,36 (FR) 0,56 (MR)

## 6.5 Strategien zur Reduzierung von Methanemissionen im Nutztierbereich

SEJIAN ET AL. (2011) fassen verschiedene Strategien zur Reduzierung der Methanausscheidung zusammen und gliedern diese in drei Hauptbereiche: Management, Fütterung und weitere (Tabelle 14).

**Tabelle 14: Strategien zur Reduzierung von Methanausscheidungen im Nutztierbereich (nach SEJIAN ET AL. 2011)**

Management	Fütterung	Weitere
Verlängerte Laktation	Krafftutterergänzung	Immunisierung
Verringerte Tierzahlen	Rationsänderung (NH <sub>3</sub> , Melasse)	Rekombinationstechnologien
Verbesserte Ernährung	Propionatförderung	Reduzierung der Tierzahlen
Strategische Supplementierung	Fettsupplementierung	Reduzierung der Produktionsmengen
Produktionssteigernde Mittel	Ionophoren-Supplementierung (Monensin)	Chemische Inhibitoren
Verbesserte genetische Selektion	Defaunation	Beeinflussung der Pansenmikroben
Verbessertes Grünlandmanagement	Tannin-Supplementierung	

Auch BOADI ET AL. (2004) summieren in ihrem Review Methanreduzierungsstrategien für Milchkühe, die verschiedene Aktivitätsbereiche berühren (Tabelle 15).

Die Verringerung der Methanausscheidungen kann effektiv über Strategien erreicht werden, die die Effizienz der Produktion verbessern, den Futteraufwand je produziertes Erzeugnis verringern oder die Fermentationseigenschaften im Pansen verändern. Viele gegenwärtige Möglichkeiten sind bewertet worden, aber nicht alle können auf Betriebsebene eingesetzt werden. Auch besteht weiterhin Forschungsbedarf zur Bewertung möglicher Effekte und Kosten.

**Tabelle 15: Zusammenfassung von Methanreduzierungsstrategien für Milchkühe (nach BOADI ET AL. 2004)**

Strategie	Potential zur CH <sub>4</sub> -Reduktion	Technologische Verfügbarkeit/Machbarkeit	Kosten/Nutzen
Verbesserung der Produktivität	20 – 30 %	umsetzbar und praktikabel	erhöhte Futterkosten, erhöhte Milchproduktion, weniger Tiere, verbesserte Futterverwertung
Erhöhung des Kraftfutterniveaus bei hoher Futtermaufnahme	25 % und mehr	umsetzbar, für Hochleistungskühe; kann N <sub>2</sub> O- und CO <sub>2</sub> -Emissionen erhöhen	erhöhte Futtermaufnahme, erhöhte Futterkosten, Technik- und Düngereinsatz, erhöhte Milchleistung
Behandlung des Grundfutters, Mahlen/Pelletieren	20 – 40 %	Umsetzbar	erhöhte Behandlungskosten, verbesserte Futterverwertung, erhöhte Milchproduktion

Fortsetzung Tabelle 15

Strategie	Potential zur CH <sub>4</sub> -Reduktion	Technologische Verfügbarkeit/ Machbarkeit	Kosten/Nutzen
Grundfutterarten und –reife	20 – 25 %	Umsetzbar	verbesserte Futterverwertung, erhöhte Milchproduktion
Rotationsweide/früher Weidebeginn	9 % oder mehr	umsetzbar	erhöhte Zaunbaukosten, verbessertes Management, erhöhte Futteraufnahme, erhöhte Milchproduktion
Gut gemanagtes intensives Beweiden gegen eingegrenzte Fütterung		umsetzbar, braucht aber Erforschung	geringere Futterkosten, kann Supplementierung erfordern, verringerte Milchinhaltsstoffe, höherer Gewinn
Verwendung von Grundfutter und Weide höchster Qualität	25 % oder mehr	Umsetzbar	erhöhte Futteraufnahme, erhöhte Milchleistung
Konservierung als Silage vs. Heu/Hilfsmittel	bis zu 33 % (Modellkalkulation)	Umsetzbar	wenig Daten
Fettzusatz	bis zu 33 %	umsetzbar und praktikabel, aber Verwendung in der Ration max. 5 bis 6 %	erhöhte Rationskosten, erhöhte Milchproduktion, evtl. kein Effekt, positiver oder kein Effekt auf Milchfett
Verwendung von Ionophoren (z.B. Monensin, Lasoloid)	11 – 30 %	umsetzbar, aber nicht nachhaltig; öffentliche Bedenken	verbesserte Futterverwertung, verringerte Futteraufnahme, verbesserte Milchleistung
Verwendung von Probiotika	10 – 50 % (in vitro)	umsetzbar, aber Forschungsbedarf	kann Futteraufnahme erhöhen, kann Milchleistung erhöhen
Verwendung essentieller Öle	8 – 14 % (in vitro)	umsetzbar, aber Forschungsbedarf	nicht quantifiziert
Verwendung von bST	9 – 16 %	in EU nicht erlaubt	verringerte Futterkosten
Protozoenhemmer	20 – 50 % (in vitro und in vivo)	nicht verfügbar für praktischen Einsatz	Kosten offen
Propionatförderer (Fumarat, Malat)	5 – 11 % (in vitro) und bis zu 23 % (in vivo)	mögliche mikrobielle Anpassung an Fumarsäure	Forschungsbedarf

## Fortsetzung Tabelle 15

Strategie	Potential zur CH <sub>4</sub> -Reduktion	Technologische Verfügbarkeit/Machbarkeit	Kosten/Nutzen
Verwendung von Acetogenen	nicht quantifiziert	nicht verfügbar, Forschungsbedarf	Forschungsbedarf
Verwendung von Bacteriocinen (z.B. Nisin, Bovicin HC5)	bis zu 50 % (in vitro)	kann Alternative zu Ionophoren sein, Forschungsbedarf	Produktionseffekte nicht bekannt
Verwendung von Methaninhibitoren	bis zu 71 % (in vitro)	keine registrierten Stoffe, keine langfristigen Effekte nachgewiesen	erhöhte Chemikalienkosten, Produktionseffekte nicht bekannt
Immunisierung	11 – 23 %	nicht verfügbar, Forschungsbedarf	mögliche Kostensteigerung, verbessertes Wachstum
Genetische Selektion (Verwendung effizienterer Tiere)	21 %	langfristige Umsetzung	verringerte Futtermittelaufnahme, erhöhte Futtermittelverwertung

## 6.6 Literatur

- AXELSSON, J. (1949): The amount of produced methane energy in the European metabolic experiments with adult cattle. *Ann. R. Agric. Coll. Sweden* 16, 404 – 419
- BANNINK, A. und V.A. HINDLE (2003): Prediction of N intake and N excretion by dairy cows from milk data (in dutch). Report 03 0008567, Animal Sciences Group Lelystad
- BENCHAAR, C.; RIVEST, J.; POMAR, C. und J. CHIQUETTE (1998): Prediction of methane production from dairy cows using existing mechanistic models and regression equations. *J. Anim. Sci.* 76, 617 - 627
- BLAXTER, K.L. und J.L. CLAPPERTON (1965): Prediction of the amount of methane produced by ruminants. *Br. J. Nutr.* 19, 511 – 522
- BOADI, D.; BENCHAAR, C.; CHIQUETTE, J. und D. MASSÉ (2004): Mitigation strategies to reduce enteric methane emissions from dairy cows: Update review. *Can. J. Anim. Sci.* 84, 319 – 335
- BRACHER, ANNELIES; SCHLEGEL, P.; MÜNGER, A.; STOLL, W. und H. MENZI (2011): The relationship between diet characteristics, milk urea, nitrogen excretion and ammonia emissions in dairy cows. EAAP Stavanger, Norway
- DIJKSTRA, J.; NEAL, H.D.; BEEVER, D.E. und J. FRANCE (1992): Simulation of nutrient digestion, absorption and outflow in the rumen: model description. *J. Nutr.* 122, 2239 - 2256
- ELLIS, J.L.; KEBREAB, E.; ODONGO, N.E.; McBRIDE, B.W.; OKINE, E.K. und J. FRANCE (2007): Prediction of methane production from dairy and beef cattle. *J. Dairy Sci.* 90, 3456 – 3467
- ELLIS, J.L.; BANNINK, A.; FRANCE, J.; KEBREAB, E. und J. DIJKSTRA (2010): Evaluation of enteric methane prediction equations for dairy cows used in whole farm models. *Global Change Biology* 16, 3246 - 3256

- FRANCE, J.; BEEVER, D.E. und R.C. SIDONS (1993): Compartmental schemes for estimating methanogenesis in ruminants from isotope dilution data. *J. Theor. Biol.* 164, 206 – 218
- HARPER, L.A.; DENMEAD, O.T.; FRENEY, J.R. und F.M. BYERS (1999): Direct measurement of methane emissions from grazing and feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 77, 1392 - 1401
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001): *Climate change 2001: the scientific basis*. Intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press. Cambridge
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2006): *IPCC Guidelines for National GHG Inventories*. IGES, Hayama, Kanagawa, Japan
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007): *Climate Change: Synthesis Report; Summary for Policymakers*.
- JENTSCH, W.; SCHWEIGEL, M.; WEISSBACH, F.; SCHOLZE, H.; PITROFF, W. und M. DERNO (2007): Methane production in cattle calculated by the nutrient composition of the diet. *Arch. Anim. Nutr.* 61, 10 - 19
- JOHNSON, K.A.; HUYLEY, M.T.; WESTBERG, H.H.; LAMB, B.K. und P. ZIMMERMAN (1994): Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a SF<sub>6</sub> technique. *Environ. Sci. Technol.* 28, 359 - 362
- JOHNSON, K.A. und D.E. JOHNSON (1995): Methane emissions from cattle. *J. Anim. Sci.* 73, 2483 - 2492
- KEBREAB, E.; CLARKE, K.; WAGNER-RIDDLE, C. und J. FRANCE (2006): Methane and nitrous oxide emissions from Canadian animal agriculture – a review. *Can. J. Anim. Sci.* 86, 135 – 158
- KEBREAB, E.; JOHNSON, K.A.; ARCHIBEQUE, S.L.; PAPE, D. und T. WIRTH (2008): Model for estimating enteric methane emissions from United States dairy and feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 86, 2738 – 2748
- KIRCHGESSNER, M.; WINDISCH, H.J.; MULLER, H.L. und M. KREUZER (1991): Release of methane and of carbon-dioxide by dairy cattle. *Agrobiol. Res.* 44, 91 - 102
- KIRCHGESSNER, M.; WINDISCH, W. und H.L. MULLER (1995): Nutritional factors for quantification of methane production. p. 333-348 in *Ruminant physiology: digestion, metabolism, growth and reproduction*. Proc. 8th International Symposium on Ruminant Physiology. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, Germany
- KRISS, M. (1930): Quantitative relations of the dry matter of the food consumed, the heat production, the gaseous outgo, and the insensible loss in body weight of cattle. *J. Agric. Res.* 40, 283 - 295
- McGINN, S.M.; FLESCHE, T.K.; HARPER, L.A. und K.A. BEAUCHEMIN (2006): An approach for measuring methane emissions from whole farms. *J. Environ. Qual.* 38, 1796 – 1802
- MILLS, J.A.N.; DIJKSTRA, J.; BANNINK, A.; CAMMEL, S.B.; KEBREAB, E. und J. FRANCE (2001): A mechanistic model of whole tract digestion and methanogenesis in the lactating dairy cow: model development, evaluation and application. *J. Anim. Sci.* 79, 1584 – 1597
- MILLS, J.A.N.; KEBREAB, E.; YATES, C.M.; CROMPTON, L.A.; CAMMEL, S.B.; DHANOA, M.S.; AGNEW, R.E. und J. FRANCE (2003): Alternative approaches to predicting methane emissions from dairy cows. *J. Anim. Sci.* 81, 3141 - 3150
- MOE, P.W. und H.F. TYRRELL (1979): Methane production in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 62, 1583 - 1586
- MOSS, A.R.; JOUNANY, J.P. und J. NEEVBOLD (2000): Methane production by ruminants: its contribution to global warming. *Ann. Zootech.* 49, 231 – 253

- MURRAY, P.J.; MOSS, A.; LOCKYER, D.R. und S.C. JARVIS (1999): A comparison of systems for measuring methane emissions from sheep. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 133, 439 - 444
- RUDDIMAN, W.F. (2003): The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. *Climate Change* 61, 261 – 293
- SEJIAN, V.; LAL, R.; LAKRITZ, J. und T. EZEJI (2011): Measurement and prediction of enteric methane emission. *Int. J. Biometeorol.* 55, 1 – 16
- SPIEKERS, H.; PRIES, M. und A. OBERMAIER (2008): Abschätzung der Stickstoffausscheidung bei der Milchkuh auf Basis von Milchwahstoffgehalt und Milchleistung. Ergänzung zur Broschüre „Bilanzierung der Nährstoffausscheidungen landwirtschaftlicher Nutztiere“ – Arbeiten der DLG/Band 199

## **7 Messung von Emissionen aus frei gelüfteten Gebäuden der Tierhaltung und von Luftwechselraten dieser Gebäude**

*W. Berg*

### **7.1 Einführung**

Die Rinder- insbesondere die Milchviehhaltung ist eine bedeutende Quelle für das Einkommen der Landwirte, aber auch für die Freisetzung unerwünschter Gase, wie z.B. Ammoniak oder Methan. Rinderställe sind fast immer Gebäude mit freier Lüftung, auch natürliche Lüftung genannt. D.h. die das Gebäude umgebenden Windverhältnisse sowie Temperaturunterschiede zwischen dem Gebäudeinneren und der Umgebung bewirken die Lüftung. Die Messung von Emissionen aus Gebäuden mit freier Lüftung stellt eine besondere Herausforderung dar. Zum einen ist diese Lüftung sehr häufig durch hohe Luftwechselraten (Verhältnis des Luftvolumenstroms zum Gebäudevolumen; Einheit:  $\text{h}^{-1}$ ) und eine große Dynamik gekennzeichnet. Dies liegt vor allem in der Variabilität der umgebenden Windverhältnisse begründet, die die Lüftung des Gebäudes maßgeblich beeinflussen. Temperaturunterschiede zwischen dem Gebäudeinneren und der Umgebung sind zwar die zweite treibende Kraft für die natürliche Lüftung, spielen aber in der Regel eine untergeordnete Rolle. Zum anderen sind die Differenzen zwischen den Gaskonzentrationen inner- und außerhalb der Gebäude oft nur gering. Das zieht größere Unsicherheiten bei der Messung und Berechnung der Emissionen nach sich.

Der Luftvolumenstrom ist nicht nur von Bedeutung für die Emissionen aus dem Gebäude, sondern auch für das Klima im Inneren des Stallgebäudes, das den Anforderungen von Mensch und Tier aber auch von Gebäude und Technik entsprechen soll. Das Stallklima beeinflusst nicht zuletzt das Wohlbefinden und die Leistung der Tiere. Die minimal erforderliche Luftwechselrate (erforderlicher Luftmassenstrom) bemisst sich nach der Wärmestrom-, Wasserdampf- und Kohlendioxid-Bilanz (DIN 18910-1, 2004), wobei sie in aller Regel in der Sommersituation durch die Wärme- und in der Wintersituation durch die Wasserdampf-Bilanz bestimmt wird. In frei gelüfteten Ställen wird die Mindestlüftrate in den allermeisten Fällen überschritten, oft um ein Mehrfaches. Neben den das Gebäude umgebenden Windverhältnissen und den Temperaturunterschieden zwischen dem Gebäudeinneren und der Umgebung einerseits bestimmt andererseits die bauliche Gestaltung des Gebäudes dessen Lüftung. Grundsätzlich gilt je größer die Lüftungsöffnungen sind desto größer ist auch die Luftwechselrate. Weitere bauliche und technische Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Gebäudelüftung sind in den Kapiteln 4 und 5 beschrieben. An Sommertagen mit einer sehr hohen Außentemperatur kann es erforderlich werden, die Luftwechselrate durch den Einsatz von Ventilatoren zu erhöhen. Zusätzlich zu einer hohen Temperatur erschwert eine hohe Luftfeuchtigkeit die Thermoregulation der Tiere.

### **7.2 Relevante Emissionen**

Bei der Messung von Emissionen aus Tierställen sind folgende Substanzen, Stoffe bzw. Verbindungen (im Folgenden kurz als Stoff bezeichnet) von Interesse:

- Ammoniak ( $\text{NH}_3$ )
- Methan ( $\text{CH}_4$ )
- Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ )
- Distickstoffmonoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ )
- Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ )
- Geruch
- Staub (Gesamtstaub, PM 10, PM 2,5) und
- Bioaerosole (Bakterien, Viren, Pilze, Pollen u.a. luftgetragene Teilchen biologischer Herkunft)

Die Wirkungen dieser gasförmigen Emissionen sind ganz unterschiedlich: Ammoniak trägt zur Versauerung und Eutrophierung von Ökosystemen bei, darüber hinaus führt es über den Weg der Stickstoffdeposition zur Bildung und Freisetzung von Distickstoffmonoxid. Methan und Distickstoffmonoxid tragen als klimarelevante Gase zur Erwärmung der Erdoberfläche bei. Andere flüchtige organische Verbindungen als Methan (NMVOC – non methane volatile organic compounds) spielen in der Tierhaltung allenfalls eine untergeordnete Rolle und finden daher keine Berücksichtigung. Kohlendioxid, das bei der Atmung der Tiere und beim biologischen Abbau organischer Substanz freigesetzt wird, ist zuvor bei der Bildung pflanzlicher Biomasse gebunden worden. D.h. es ist im Stoffkreislauf neutral und nicht als Emission zu berücksichtigen. Kohlendioxid, das bei der Verbrennung fossiler Energieträger freigesetzt wird, stellt dagegen eine klimarelevante Emission dar. Des Weiteren kann es durch Landnutzungsänderungen zum Abbau von im Boden gespeichertem Kohlenstoff und seiner Freisetzung in Form von Kohlendioxid kommen. Der Anteil der Landwirtschaft an den anthropogenen Kohlendioxid-Emissionen in Deutschland ist wenig relevant, dementsprechend gering ist hier das Potential die Freisetzung klimarelevanter Gase zu vermindern (UBA, 2013). Schwefelwasserstoff bildet mit Luft ein explosionsfähiges Gemisch (> 4 Vol-%) und wirkt in Konzentrationen ab 500 ppm akut toxisch. Die maximale zulässige Arbeitsplatz-Konzentration beträgt  $5 \text{ ml m}^{-3}$  (Empfehlung; DFG, 2014). Von Geruch geht keine Gesundheitsgefahr aus, Geruch stellt eine Belästigung dar. Staub kann neben einer Belästigung sehr wohl auch eine Gefährdung der Gesundheit sein, Gemische von Staub und Luft können auch explosionsfähig sein. Deshalb wird Staub hinsichtlich seiner Größe (Grobstaub, Feinstaub) und Stoffbestandteile unterschieden. Bioaerosole können allergen, toxisch oder infektiös wirken. Ihre Freisetzung und ihr Transport in die Umgebung hängen von vielen Faktoren ab. Zu Bioaerosolen aus Anlagen der Tierhaltung liegen bisher nur wenige Untersuchungen vor.

Für die genannten Stoffe existieren Grenzwerte, die nicht überschritten werden dürfen. Diese Grenzwerte beziehen sich auf die Konzentration, die Emission oder beides, wie im Fall von Ammoniak. So soll bspw. die Ammoniakkonzentration im Aufenthaltsbereich von Kälbern  $20 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-3}$  nicht überschreiten (TIERSCHNUTZTV, 2006). Zur Verminderung der Ammoniak-, Methan- und Distickstoffmonoxid-Emissionen existieren internationale Übereinkommen und Richtlinien zu deren Umsetzung Deutschland sich verpflichtet hat (MULTIKOMPONENTEN-PROTOKOLL, 2004; NEC-RICHTLINIE, 2001; KYOTO-PROTOKOLL, 1997). Die Umsetzung dieser Übereinkommen erfolgt vor allem über das Bundes-Immissionsschutzgesetz und die TA Luft (BUNDES-IMMISSIONSSCHUTZGESETZ, 2013; TA LUFT, 2002). Für Geruchsmissionen sind in verschiedenen nationalen Richtlinien (GIRL, 2008; VDI-RL 3894-2, 2011) zulässige Höchstgrenzen für Geruchsstoffkonzentrationen und Immissionshäufigkeiten vorgegeben, die ihre Anwendung in Genehmigungsverfahren finden. Regelungen zu Staubimmissionen finden sich in den bereits genannten Richtlinien (TA LUFT, 2002; VDI-RL 3894-1, 2011).

### 7.3 Messung von Emissionen

Emissionen aus frei gelüfteten Gebäuden können prinzipiell mit den folgenden vier Methoden ermittelt werden:

- 1) Messung des Luftvolumenstroms ( $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ ) sowie der Differenz der Konzentrationen der interessierenden Stoffe inner- und außerhalb des Gebäudes ( $\text{mg m}^{-3}$ )
- 2) Tracer-Ratio-Methode – kontrollierte Freisetzung eines Tracers ( $\text{g h}^{-1}$ ) und Messung der Konzentrationen des Tracers sowie der interessierenden Stoffe inner- und außerhalb des Gebäudes ( $\text{mg m}^{-3}$ )
- 3) Messung der Konzentrationen der interessierenden Stoffe sowie von Windrichtung und -geschwindigkeit in der unmittelbaren Umgebung des Stallgebäudes (auch mikrometeorologische Methoden genannt)
- 4) Messung des Stoffeintrages in der Umgebung des Stallgebäudes mit Sammlern (sogenannte Passivsammler / passive flux samplers)

**1)** Die Ermittlung des Emissionsstroms  $\dot{E}$  ( $\text{mg h}^{-1}$ ) aus dem Produkt von Luftvolumenstrom  $\dot{V}$  ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ) und Differenz der Gaskonzentrationen inner- und außerhalb des Gebäudes ( $c_{\text{innen}} - c_{\text{außen}}$ ) ( $\text{mg m}^{-3}$ ) (Gleichung 1) bietet den Vorzug, dass mit der Messung der Luftvolumenstroms zugleich ein Parameter zur Charakterisierung des Stallklimas vorliegt. Die Ermittlung des Luftvolumenstroms frei gelüfteter Gebäude ist mit ganz unterschiedlichen Methoden möglich, die im nachfolgenden Abschnitt ‚Messung von Luftvolumenströmen‘ erläutert werden.

$$\dot{E} = \dot{V} \cdot (c_{\text{innen}} - c_{\text{außen}}) \quad (1)$$

Das Ermitteln des zweiten Faktors in Gleichung (1), d.h. die Messung der Gaskonzentrationen inner- und außerhalb des Gebäudes kann prinzipiell mit allen Geräten erfolgen, die für die vorherrschenden Konzentrationsbereiche und Umgebungsbedingungen geeignet sind. Auch für die Messung der Lufttemperatur, -feuchte und -geschwindigkeit sowie der anderen benötigten Größen gibt es keine grundsätzlichen Einschränkungen hinsichtlich geeigneter Messgeräte bzw. Messprinzipie.

Diese und die als nächstes beschriebene Methode haben die meist verbreitete Anwendung gefunden.

**2)** Bei der Tracer-Ratio-Methode lässt man im Stallgebäude ein Tracer-Gas definiert emittieren ( $\dot{E}_{\text{Tracer}}$ ;  $\text{mg h}^{-1}$ ). Die Konzentrationen des Tracers ( $c_{\text{Tracer}}$ ;  $\text{mg m}^{-3}$ ) und der interessierenden Stoffe  $c$  ( $\text{mg m}^{-3}$ ) werden inner- und außerhalb des Gebäudes gemessen. Aus dem Verhältnis der Konzentrationsdifferenz des Tracers ( $c_{\text{Tracer,innen}} - c_{\text{Tracer,außen}}$ ;  $\text{mg m}^{-3}$ ) zu der des interessierenden Stoffes ( $c_{\text{innen}} - c_{\text{außen}}$ ;  $\text{mg m}^{-3}$ ) wird auf den Emissionsstrom des interessierenden Stoffes  $\dot{E}$  ( $\text{mg h}^{-1}$ ) geschlossen (Gleichung 2).

$$\dot{E} = \dot{E}_{\text{Tracer}} \cdot \frac{(c_{\text{Tracer,innen}} - c_{\text{Tracer,außen}})}{(c_{\text{innen}} - c_{\text{außen}})} \quad (2)$$

Bei der Tracer-Ratio-Methode muss zur Ermittlung des Emissionsstroms des interessierenden Stoffes  $\dot{E}$  ( $\text{mg h}^{-1}$ ) der Luftvolumenstrom  $\dot{V}$  ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ) nicht explizit berechnet werden. Er lässt sich aber aus der bekannten Freisetzung ( $\dot{E}_{\text{Tracer}}$ ;  $\text{mg h}^{-1}$ ) und den gemessenen Konzentrationen des Tracers ( $c_{\text{Tracer}}$ ;  $\text{mg m}^{-3}$ ) kalkulieren (unter Nutzung des in Gleichung (1) bereits dargestellten Zusammenhangs; Gleichung 3).

$$\dot{V} = \frac{\dot{E}_{\text{Tracer}}}{(c_{\text{Tracer,innen}} - c_{\text{Tracer,außen}})} \quad (3)$$

Der Einsatz von Tracern muss einer Reihe von Anforderungen gerecht werden, die wichtigsten dieser Anforderungen sind: Art und Weise der Freisetzung des Tracers müssen denen des interessierenden Stoffes möglichst genau entsprechen und beide Gase müssen sich gut durchmischen sowie ähnlich verhalten, d.h. insbesondere ähnlich ausbreiten.

**3)** Bei der Ermittlung der Emissionen mit Hilfe der mikrometeorologischen Methoden misst man die Konzentrationen der interessierenden Gase sowie Windrichtung und -geschwindigkeit ( $\Rightarrow$  Volumenstrom  $\dot{V}$ ;  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ) in der unmittelbaren Umgebung des Stallgebäudes. Aus der Differenz zwischen den Gaskonzentrationen  $\Delta c$  ( $\text{mg m}^{-3}$ ) auf der dem Wind abgewandten und der dem Wind zugewandten Seite wird auf den Emissionsstrom  $\dot{E}$  ( $\text{mg h}^{-1}$ ) geschlossen (Gleichung 4).

$$\dot{E} = \Delta c \cdot \dot{V} \quad (4)$$

Misst man die Gaskonzentrationen sowie Windrichtung und -geschwindigkeit in verschiedenen Höhen, so ist es auch möglich, den Emissionsstrom anhand der vertikalen Gradienten zu berechnen. Bei dem mit den mikrometeorologischen Methoden gemessenen Volumenstrom  $\dot{V}$

kann nicht festgestellt werden, inwieweit er das Gebäude durchströmt oder umströmt; er kann also nicht mit dem Luftvolumenstrom des Stallgebäudes gleichgesetzt werden.

Die mikrometeorologischen Messmethoden behandeln das Stallgebäude als Flächenquelle und lassen sich auch zur Messung von Emissionen aus anderen Flächenquellen, wie z.B. Dunglagern, anwenden. Neben der Nichtermittlung des Luftvolumenstroms des Stallgebäudes ist ein weiterer Nachteil der mikrometeorologischen Messmethoden ihr hoher messtechnischer Aufwand.

4) Die Ermittlung von Emissionen durch Messung des Stoffeintrages in der Umgebung des Stallgebäudes mit Sammlern (vorzugsweise mit sogenannten Passivsammlern / passive flux samplers) ist ähnlich der zuvor unter 3) beschriebenen Methode. Anstelle der Gaskonzentrationen werden mittels von Passivsammlern die absoluten Mengen der emittierenden Stoffe in der Umgebung des Stallgebäudes ermittelt und für die Berechnung des Emissionsstroms  $\dot{E}$  ( $\text{mg h}^{-1}$ ) benutzt (Gleichung (5)).  $\Delta m$  (mg) ist die mit den Sammlern erfasste Masse des interessierenden Stoffes abzüglich der Masse (des selben Stoffes), die aufgrund der Hintergrundkonzentration in die Sammler gelangt ist.  $\Delta t$  (h) ist die Zeitdauer über die die Sammler dem zu detektierenden Stoff ausgesetzt sind.

$$\dot{E} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (5)$$

Passivsammler sind wesentlich einfacher aufgebaut als Messgeräte zur Analyse von Gaskonzentrationen und damit deutlich kostengünstiger. Neben diesem Vorteil weisen Passivsammler aber mehrere Nachteile auf. So müssen Passivsammler dem zu detektierenden Stoff über eine längere Zeitdauer ausgesetzt sein, um den Stoff mit hinreichender Genauigkeit quantifizieren zu können. Diese Zeitdauer beträgt mindestens mehrere Stunden (SCHOLTENS ET AL., 2004) bis zu mehreren Wochen (VON BOBRUTZKI ET AL., 2012). Mit Passivsammlern kann man Tagesmittelwerte bestimmen, nicht aber Stundenmittelwerte. Von Nachteil kann auch sein, dass Passivsammler während der Messung keine Werte liefern, sondern erst nach ihrer Analyse im Labor. Jeder einzelne Sammler kann sich bei sich ändernden Windrichtungen innerhalb des Sammelzeitraums sowohl auf der dem Wind zugewandten als auch auf der dem Wind abgewandten Seite des Gebäudes befinden. Daraus folgt, dass die Hintergrundkonzentration des Stoffes, dessen Emission zu ermitteln ist, bekannt sein bzw. ebenfalls zu messen ist. Dies findet, wie bei den mikrometeorologischen Messmethoden, durch die Messung von Windrichtung und -geschwindigkeit an jedem Messpunkt (Sammler) Berücksichtigung. Aber auch hier liefert der so gemessene Volumenstrom  $\dot{V}$  keine Werte für den Luftvolumenstrom (oder die Luftwechselrate) des Stallgebäudes.

## 7.4 Messung von Luftvolumenströmen

Die Ermittlung des Luftvolumenstroms ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ) ist prinzipiell mit vier verschiedenen Methoden möglich:

- I) Bilanzierungsmethoden
- II) Tracermethoden
- III) Direkte Messung des Luftvolumenstroms
- IV) Indirekte Messung des Luftvolumenstroms

I) Die Bilanzierungsmethoden basieren auf der Kenntnis der Kohlendioxid-, Wasserdampf- und Wärmeabgabe der Tiere. Somit stehen drei Bilanzierungsmethoden zur Verfügung:

- Kohlendioxid-Bilanz
- Wasserdampf-Bilanz
- Wärmestrom-Bilanz

Mit den Bilanzen werden die (mit der Zuluft und der Sonnenstrahlung) dem Stallgebäude zugeführten und im Stallgebäude (hauptsächlich durch die Tiere) frei werdenden Mengen an Kohlendioxid, Wasserdampf und Wärme den (mit der Abluft und Abstrahlung (über den Stallboden)) abgeführten Mengen gegenüber gestellt. Wie eingangs erwähnt, werden diese Bilanzen zur Berechnung der Mindestluftstraten (erforderlicher Luftmassenstrom) genutzt (DIN 18910-1, 2004). Dazu werden maximal zulässige Konzentrationen an Kohlendioxid (5,0 g CO<sub>2</sub> je kg trockener Luft) und Wasserdampf in der Stallluft und eine maximal zulässige Temperaturdifferenz zwischen Stall- und Außenluft (3 bzw. 4 Kelvin für Rinder) festgelegt. Die vereinfachten Gleichungen (6) bis (8) zur Berechnung des erforderlichen Luftmassenstroms  $\dot{m}$  (kg h<sup>-1</sup>) sollen das Grundprinzip der drei Bilanzen veranschaulichen. Für konkrete Berechnungen sind u.a. der Zusammenhang von Wasserdampf-Konzentration und Temperatur der Luft sowie ihrer Wärmekapazität zu berücksichtigen, ebenso die veränderliche Abgabe sensibler Wärme durch die Tiere in Abhängigkeit von der Temperatur der sie umgebenden Luft und von weiteren Faktoren, die durch Haltung und Fütterung bestimmt werden.

Kohlendioxid-Bilanz:

$$\dot{m} = \frac{\Sigma \dot{C}_{CO_2}}{(c_{CO_2_{\text{innen}}} - c_{CO_2_{\text{außen}}})} \quad (6)$$

$\Sigma \dot{C}_{CO_2}$  - Kohlendioxid-Massestrom (g h<sup>-1</sup>)

$c_{CO_2_{\text{innen}}}$  - Kohlendioxid-Konzentration der Stallluft (g kg<sup>-1</sup>)

$c_{CO_2_{\text{außen}}}$  - Kohlendioxid-Konzentration der Außenluft (g kg<sup>-1</sup>)

Wasserdampf-Bilanz:

$$\dot{m} = \frac{\Sigma \dot{X}}{(x_{\text{innen}} - x_{\text{außen}})} \quad (7)$$

$\Sigma \dot{X}$  - Wasserdampf-Massestrom (g h<sup>-1</sup>)

$x_{\text{innen}}$  - Wasserdampf-Konzentration der Stallluft (g kg<sup>-1</sup>)

$x_{\text{außen}}$  - Wasserdampf-Konzentration der Außenluft (g kg<sup>-1</sup>)

Wärmestrom-Bilanz:

$$\dot{m} = \frac{\Sigma \dot{Q}}{\Delta \Theta \cdot k} \quad (8)$$

$\Sigma \dot{Q}$  - Strom sensibler Wärme, der mit der Stallluft abzuführen ist (W)

$\Delta \Theta$  - zulässige Temperaturdifferenz zwischen Stallluft und Außenluft (K)

$k$  - spezifische Wärmekapazität der Luft (Wh kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)

Mit Hilfe dieser Gleichungen kann man die tatsächlichen Luftmassenströme (bzw. Luftvolumenströme) ermitteln, indem, abgesehen von der Kohlendioxid-, Wasserdampf- und Wärmeabgabe der Tiere, die Parameter auf der rechten Seite der Gleichungen gemessen werden, anstatt sie mit maximal zulässigen Werten zu versehen.

In der Praxis sind die mit diesen Bilanzen ermittelten Luftvolumenströme (bzw. Luftwechselraten) mit großen Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten sind zum einen in der großen, messtechnischen Herausforderung begründet, zum anderen in der Unsicherheit der Daten zur

Kohlendioxid-, Wasserdampf- und Wärmeabgabe der Tiere. Die Ermittlung dieser Daten liegt z.T. mehrere Jahrzehnte zurück. Es wird immer wieder der Bedarf geäußert, die Gültigkeit dieser Daten für die heutigen Züchtungen, Leistungen sowie Haltungs- und Fütterungsbedingungen der Tiere zu prüfen.

Von diesen Bilanzen wird die Kohlendioxid-Bilanz bevorzugt angewendet. Sie liefert genauere Ergebnisse als die beiden anderen Methoden und ist messtechnisch gut realisierbar. Vor allem bei nicht wärmedämmten Gebäuden ist sie den beiden anderen Methoden vorzuziehen (PEDERSEN ET AL., 1998). Die Kohlendioxid-Bilanz ist eine sehr oft benutzte Methode zur Ermittlung des Luftvolumenstroms frei gelüfteter Gebäude.

II) Bei der Verwendung von Tracern unterscheidet man ebenfalls drei unterschiedliche Methoden:

- Abklingmethode (einmalige bzw. wiederholte Zudosierung des Tracers)
- Konstante Zudosierung des Tracers (Tracer-Ratio-Methode)
- Konstante Konzentration des Tracers

Bei der **Abklingmethode** wird der Tracer vor dem Beginn der Messung im Gebäude freigesetzt. Er soll sich idealerweise gleichmäßig im gesamten Raum verteilen und mit der Raumluft ein homogenes Gemisch bilden. Nachdem dieser Zustand erreicht und die Zudosierung des Tracers beendet ist beginnt die Ermittlung des Luftvolumenstroms durch Messung der Konzentration des Tracers (Messbeginn,  $t_0$ ). Die Tracerkonzentration im Gebäude nimmt über die Zeit bis zur Konzentration  $c_{Tracer_{t_1}}$  zum Ende der Messung ( $t_1$ ) ab. Der Luftvolumenstrom  $\dot{V}$  ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ) lässt sich mit Gleichung (9) berechnen.

$$\dot{V} = \frac{V}{\rho \cdot (t_1 - t_0)} \cdot (\ln c_{Tracer_{t_0}} - \ln c_{Tracer_{t_1}}) \quad (9)$$

$\dot{V}$  - Luftvolumenstrom ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ )

$V$  - Gebäudevolumen ( $\text{m}^3$ )

$c_{Tracer_{t_0/t_1}}$  - Konzentration des Tracers zu den Zeiten  $t_0$  oder  $t_1$  ( $\text{mg m}^{-3}$ )

$\rho$  - Luftdichte ( $\text{mg m}^{-3}$ )

$t_0$  - Zeit zu Messbeginn (h)

$t_1$  - Zeit zu Messende (h)

Die Abklingmethode hat zwei Nachteile: in der Realität gelingt es nicht den Tracer unmittelbar vor der Messung tatsächlich homogen im gesamten Volumen des Gebäudes zu verteilen, und die Messung der Konzentrationsabnahme und damit des Luftvolumenstroms kann nur über eine begrenzte Zeitdauer (maximal bis zum Absinken der Konzentration unter die Nachweisgrenze des jeweiligen Messgerätes) erfolgen (KIWAN ET AL., 2013). Diese Zeitdauer ist umso kürzer je größer die Luftwechselrate ist. Diesem, zweit genannten Nachteil kann man begegnen, indem man die Tracerfreisetzung wiederholt. Das erhöht den Aufwand erheblich und dennoch wird die Abklingmethode nicht zu einer kontinuierlichen Messmethode.

Bei konstanter Zudosierung des Tracers in die Raumluft erreicht die Tracerkonzentration in der Raumluft nach einer Anstiegsphase einen gleichbleibenden Wert wenn der Luftvolumenstrom konstant bleibt. Diese Phase des Anstiegs der Tracerkonzentration kann man durch eine anfänglich höhere Tracerfreisetzung verkürzen. Nach dieser kurzen Anfangsphase kann der Luftvolumenstrom  $\dot{V}$  aus der bekannten (gemessenen) Freisetzungsrates des Tracers ( $\dot{E}_{Tracer}$ ;

mg h<sup>-1</sup>) und seiner gemessenen Konzentration in der Raumluft ( $c_{\text{Tracer}}$ ; mg m<sup>-3</sup>) entsprechend Gleichung (3) berechnet werden, so wie bereits im Abschnitt ‚Messung von Emissionen‘ 2) Tracer-Ratio-Methode beschrieben. Die Zudosierung des Tracers wird üblicherweise so bemessen, dass die Tracerkonzentration gut im Messbereich der eingesetzten Analysegeräte liegt und mit hoher Genauigkeit gemessen werden kann.

Diese Methode und die Kohlendioxid-Bilanz finden am häufigsten Anwendung bei der Ermittlung des Luftvolumenstroms frei gelüfteter Gebäude.

Die Methode der konstanten Konzentration des Tracers baut auf der zuvor beschriebenen Methode auf, wobei die Zudosierung des Tracers entsprechend der gemessenen Tracerkonzentration in der Raumluft so angepasst wird, dass diese Konzentration auch bei sich änderndem Luftvolumenstrom gleich bleibt. Der Luftvolumenstrom wird auch hier nach Gleichung (3) berechnet, die Freisetzungsrates des Tracers ( $\dot{E}_{\text{Tracer}}$ ; mg h<sup>-1</sup>) ist veränderlich.

Bei der Methode der konstanten Konzentration des Tracers sind, genau wie bei der Methode der konstanten Zudosierung des Tracers, die Freisetzungsrates und die Konzentrationen des Tracers zu messen. Durch die Regelung der Zudosierung des Tracers erhöht sich der Aufwand deutlich. Dies ist vor allem bei stark bzw. schnell veränderlichen Luftvolumenströmen eine besondere Herausforderung. Aber gerade in diesen Fällen könnte man mit der veränderlichen Tracerdosierung erreichen, weitgehend im gewünschten Konzentrationsbereich (z.B. der höchsten Genauigkeit) zu messen.

Die Methode der konstanten Konzentration des Tracers hat sich im Bereich der Ermittlung des Luftvolumenstroms frei gelüfteter Stallgebäude nicht durchgesetzt.

**III)** Die direkte Messung des Luftvolumenstroms erfordert die Messung der Luftgeschwindigkeit (Betrag und Richtung) in allen Lufteintritts- oder Luftaustrittsöffnungen bei bekannter Größe (Querschnitt) dieser Öffnungen. Die Messung muss dreidimensional erfolgen. Sehr gut geeignet sind bspw. 3D-Ultraschall-Anemometer (FIEDLER ET AL., 2013). Die Ansprüche an einen geeigneten Messaufbau wachsen mit zunehmender Größe der Stallgebäude und der Gebäudeöffnungen nicht nur durch eine steigende Anzahl synchron messender Sensoren, sondern auch durch die Notwendigkeit repräsentative Messorte herauszufinden (KIWAN ET AL., 2012; OZCAN, 2011).

**IV)** Eine Möglichkeit den Luftvolumenstrom indirekt zu ermitteln, ist die Messung der Druckdifferenzen zwischen Innen und Außen an jeder Öffnung des Gebäudes. Es gibt hochempfindliche Drucksensoren mit denen solche Messungen, zumindest an kleineren Lüftungsöffnungen möglich sind. Die Herausforderung entsteht auch hier, ähnlich wie bei der direkten Messung des Luftvolumenstroms, durch die zunehmende Größe der Stallgebäude und der Gebäudeöffnungen. Für eine große Anzahl synchron messender Sensoren sind repräsentative Messorte zu finden. Auch für diese Methode steht ein Nachweis der Eignung eines entsprechenden Messsystems zur Ermittlung des Luftvolumenstroms frei gelüfteter Stallgebäude noch aus (DEMMERS ET AL., 2001; OZCAN, 2011).

## 7.5 Messprotokolle

Zur Ermittlung repräsentativer Daten für die Emissionen und das Stallklima sind neben der Messung der Luftvolumenströme und der Gaskonzentrationen an sich eine Reihe weiterer methodischer Details festzulegen. Dazu zählen neben einer ausreichenden Beschreibung des Messobjektes, einschließlich der Charakterisierung des Tierbestandes und der Fütterung, die Festlegung der Anzahl an Standorten/Betrieben und Messtagen, an denen Messungen durchzuführen sind. Einzelne Messungen müssen eine Zeitdauer von mindestens 24 Stunden umfassen, um die Produktionsabläufe sowie Tieraktivitäten und die daraus resultierenden Veränderungen innerhalb eines Tages zu erfassen. Mit mehreren Einzelmessungen (insgesamt mindestens 6 Tage, mindestens zu drei verschiedenen Jahreszeiten) sind die jahreszeitlich bedingten

Veränderungen zu erfassen, die für die einzelnen Emissionen ganz verschieden sein können (SAHA ET AL., 2014). Nur wenn die gesamte Vorgehensweise bei der Durchführung solcher Messungen bis hin zur Auswertung der Daten abgestimmt erfolgt, kann man zu miteinander vergleichbaren Ergebnissen gelangen. Seit einigen Jahren findet man derartige Aktivitäten auf nationaler und internationaler Ebene unter der Bezeichnung „Messprotokolle“ bzw. „Measurement Protocols“. In Deutschland wurden in der KTBL-Arbeitsgruppe „Emissionsfaktoren Tierhaltung“ ein Messprotokoll für zwangsgelüftete Ställe und ein Messprotokoll für frei gelüftete Ställe ausgearbeitet, in denen die Vorgehensweise zur Ermittlung repräsentativer Emissionsfaktoren beschrieben ist (KTBL, 2013).

## 7.6 Ausblick

Die Unsicherheiten, mit denen die ermittelten Luftwechselraten und Emissionsströme behaftet sind, aber auch Weiterentwicklungen in der Messtechnik wie in den Verfahren der Tierhaltung stellen eine ganze Reihe zu lösender Aufgaben. Zwei zu nennende Schwerpunkte sind die Bestimmung der Messorte im, am bzw. um frei gelüftete Stallgebäude sowie die Weiterentwicklung der Methoden zur Ermittlung des Luftvolumenstroms dieser Stallgebäude. Der erstgenannte Punkt schließt auch die Wahl der Anzahl der Messpunkte ein. Dies ist besonders mit zunehmender Größe der Gebäude selbst und der Gebäudeöffnungen, die abwechselnd als Zu- und Abluftöffnung fungieren (FIEDLER, ET AL., 2014; SAHA ET AL., 2013), von Bedeutung. Der erstgenannte Punkt steht im Zusammenhang mit dem zweitgenannten – der Weiterentwicklung der Methoden zur Ermittlung des Luftvolumenstroms frei gelüfteter Gebäude. Hier geht es vornehmlich darum, die Unsicherheiten der Messergebnisse zu verringern. Vielfach wird der Wunsch nach einer Referenzmethode geäußert (OGINK ET AL., 2013). Eine Referenzmethode könnte die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zum Luftvolumenstrom, aber eben auch zu den Emissionsströmen verbessern. Entscheidend dafür ist aber die genannte Verringerung der Unsicherheiten der Ergebnisse, bei zugleich breiter Anwendbarkeit der Methode für die unterschiedlichen Messobjekte. Fortschritte sind (nicht nur) bei den beiden genannten Schwerpunkten vor allem dann zu erwarten, wenn es gelingt, Messungen im Feld, physikalische Modellierungen und numerische Simulationen gut miteinander zu verknüpfen.

## 7.7 Literatur

BImSchG (2013): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG). 17. Mai 2013. BGBl. I S. 1274

BOBRUTZKI, K. VON; AMMON, C.; BERG, W.; EINERT, P.; FIEDLER, M.; MÜLLER, H.-J.; SCHERER, D. AND B. STROHBACH (2012): Ammonia emissions from a broiler farm: spatial variability of airborne concentrations in the vicinity and impact on adjacent woodland. *Environ Monit Assess* 184, 3775–3787

DEMMERS, T.G.M.; PHILLIPS, V.R.; SHORT, L.S.; BURGESS, L.R.; HOXEY, R.P. AND C.M. WATHES (2001): Validation of ventilation rate measurement methods and the ammonia emission from naturally ventilated dairy and beef buildings in the United Kingdom. *J. Agric. Engng. Res.* 79 (1), 107–116

DFG (2014): MAK- und BAT-Werte-Liste 2014, Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe. DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft, Mitteilung 50, Wiley-VCH, Weinheim

DIN 18910-1 (2004): Wärmeschutz geschlossener Ställe - Wärmedämmung und Lüftung - Teil 1: Planungs- und Berechnungsgrundlagen für geschlossene zwangsbelüftete Ställe. Beuth-Verlag, Berlin

FIEDLER M.; BERG, W.; AMMON, C.; LOEBSIN, C.; SANFTLEBEN, P.; SAMER, M.; VON BOBRUTZKI, K.; KIWAN, A. AND C.K. SAHA (2013): Air velocity measurements using ultrasonic anemometers in the animal zone of a naturally ventilated dairy barn. *Biosystems Engineering* 116, 276–285

- FIEDLER M.; SAHA, C.K.; AMMON, C.; BERG, W.; LOEBSIN, C.; SANFTLEBEN, P. AND T. AMON (2014): Spatial distribution of air flow and CO<sub>2</sub> concentration in a naturally ventilated dairy building. *Environmental Engineering and Management Journal* 13 (9), 2193–2200
- GIRL (2008): Geruchsimmissions-Richtlinie – Feststellung und Beurteilung von Geruchsimmissionen. Länderausschuss für Immissionsschutz, 2008
- KIWAN; A.; BERG, W.; BRUNSCH, R.; ÖZCAN, S.; MÜLLER, H.-J.; GLÄSER, M.; FIEDLER, M.; AMMON, C. AND D. BERCKMANS (2012): Tracer gas technique, air velocity measurement and natural ventilation method for estimating ventilation rates through naturally ventilated barns. *Agric Eng Int: CIGR Journal* 14 (4), 22–36
- KIWAN; A.; BERG, W.; FIEDLER, M.; AMMON, C.; GLÄSER, M.; MÜLLER, H.-J. AND R. BRUNSCH (2013): Air exchange rate measurements in naturally ventilated dairy buildings using the tracer gas decay method with <sup>85</sup>Kr, compared to CO<sub>2</sub> mass balance and discharge coefficient methods. *Biosystems Engineering* 116, 286–296
- KYOTO-PROTOKOLL (1997): Protokoll von Kyoto vom 11. Dezember 1997 zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen. 2. Mai 2002, BGBl. II Nr. 16 S. 966
- KTBL (2013): Vorgehensweise zur Ermittlung repräsentativer Emissionsfaktoren - Messprotokoll für offene Stallsysteme – Beispiel Milchviehstall. KTBL, Darmstadt  
[https://www.ktbl.de/fileadmin/user\\_upload/artikel/Tierhaltung/Allgemeines/Ammoniak-Emissionsfaktoren/Messprotokoll-Offenstall.pdf](https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/artikel/Tierhaltung/Allgemeines/Ammoniak-Emissionsfaktoren/Messprotokoll-Offenstall.pdf) 05.09.2014
- MULTIKOMPONENTEN-PROTOKOLL (2004): Protokoll zu dem Übereinkommen von 1979 über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung betreffend die Verringerung von Versauerung, Eutrophierung und bodennahem Ozon. 3. Juli 2004, BGBl. II Nr. 21 S. 884
- NEC-RICHTLINIE (2001): Richtlinie 2001/81/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23.10.2001 über nationale Emissionshöchstmenge für bestimmte Luftschadstoffe. ABl. EG vom 27.11.2001 L 309/22
- ÖZCAN, S.E. (2011): Techniques to determine ventilation rate and airflow characteristics through naturally ventilated buildings. PhD Thesis, KU Leuven
- OGINK, N.W.M.; MOSQUERA, J.; CALVET, S. AND G. ZHANG (2013): Methods for measuring gas emissions from naturally ventilated livestock buildings: Developments over the last decade and perspectives for improvement. *Biosystems Engineering* 116, 297–308
- PEDERSEN, S.; TAKAI, H.; JOHNSEN, J.O.; METZ, J.H.M.; GROOT KOERKAMP, P.W.G.; UENK, G.H.; PHILLIPS, V.R.; HOLDEN, M.R.; SNEATH, R.W.; SHORT, J.L.; WHITE, R.P.; HARTUNG, J.; SEEDORF, J.; SCHRÖDER, M.; LINKERT, K.H. AND C.M. WATHES (1998): A comparison of three balance methods for calculating ventilation rates in livestock buildings. *J. Agric. Engng. Res.* 70, 25–37
- SAHA, C.K.; AMMON, C.; BERG, W.; LOEBSIN, C.; FIEDLER, M.; BRUNSCH, R. AND K. VON BOBRUTZKI (2013): The effect of external wind speed and direction on sampling point concentrations, air change rate and emissions from a naturally ventilated dairy building. *Biosystems Engineering* 114, 267–278
- SAHA, C.K.; AMMON, C.; BERG, W.; FIEDLER, M.; LOEBSIN, C.; SANFTLEBEN, P.; BRUNSCH, R. AND T. AMON (2014): Seasonal and diel variations of ammonia and methane emissions from a naturally ventilated dairy building and the associated factors influencing emissions. *Sci Total Environ* 468–469, 53–62
- SCHOLTENS, R.; DORE, C.J.; JONES, B.M. R.; LEE, D.S. AND V.R. PHILLIPS (2004): Measuring ammonia emission rates from livestock buildings and manure stores - part 1: development and validation of external tracer ratio, internal tracer ratio and passive flux sampling methods. *Atmospheric Environment* 38 (19), 3003–3015

TA LUFT (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002. GMBI. 2002, H. 25–29, S. 511–605

TIERSCHNUTZTV (2006): Verordnung zum Schutz landwirtschaftlicher Nutztiere und anderer zur Erzeugung tierischer Produkte gehaltener Tiere bei ihrer Haltung (Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung – TierSchNutzTV). 22. August 2006, BGBl. I S. 2043

UBA (2013): Klimaschutz und Emissionshandel in der Landwirtschaft. Climate Change 01/2013, UBA, Dessau-Roßlau,  
<http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4397.pdf>  
05.09.2014

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

VDI-RL 3894-2 (2011): Emissionen und Immissionen aus Tierhaltungsanlagen – Methode zur Abstandbestimmung (Abstandsregelung) Geruch. VDI-Richtlinie 3894, Blatt 2, Entwurf, Juni 2011, Beuth Verlag, Berlin

## **8 Schlussfolgerungen zur weiteren Arbeit der Arbeitsgruppe**

Der Umfang der Aufgaben auf dem Gebiet der Agrarforschung hinsichtlich Stallklima und Emissionen verhält sich umgekehrt proportional zur personellen Ausstattung der Landeseinrichtungen und des Leibniz-Instituts für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. Um auch weiter die zeitaktuellen Aufgaben effizient lösen zu können, ist eine Kooperation und Bündelung der fachlichen Kompetenz auf diesem Gebiet notwendig.

Die vorliegende Broschüre ist ein Produkt dieser interdisziplinären Zusammenarbeit der qualifizierten fachlichen Kompetenzen der Landeseinrichtungen und des Leibniz-Institutes für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. und stellt eine gewisse Abrechnung der gemeinsamen Arbeit der vergangenen Jahre dar.

Gekennzeichnet von einem regen Gedankenaustausch werden aktuelle und geplante Projekte der einzelnen Einrichtungen in der Arbeitsgruppe vorgestellt, Untersuchungsmethoden abgeglichen, aktuelle Probleme diskutiert und neue Ideen für zukünftige Aufgaben entwickelt. Die Nutzung dieser Synergien sollte auch zukünftig in der gemeinsamen interdisziplinären Bearbeitung einzelner Themen münden.

Die Unterschiede in der fachlichen Spezialisierung der Mitarbeiter als auch in der technischen Ausstattung der Landeseinrichtungen und des Leibniz-Instituts ergänzen sich und führen letztendlich trotz oder wegen einer differenzierten Herangehensweise an die Problematik zu einer umfassenden Betrachtung der gestellten Thematik.

Auf der Grundlage der Erkenntnisse in der Zusammenarbeit werden neue Themen aufgegriffen bzw. bereits vorhandene Ergebnisse zusammengeführt und durch neue weiterreichende Untersuchungen aktualisiert.

Die Notwendigkeit der Bündelung der limitierten Ressourcen in den beteiligten Einrichtungen und die synergetischen Effekte der interdisziplinären Zusammenarbeit sind Impulse, die Tätigkeit der Arbeitsgruppe fortzuführen.