

Wärme-, Wasserdampf- und Kohlendioxidanfall in Milchviehställen

Von Bernhard Schneider, Bonn, und
Wolfgang Müller, Hohenheim*)

DK 631.22:636.04:628.8

Für die Planung von Lüftungen und Wärmerückgewinnungsanlagen in Ställen werden exakte Daten des Wärme-, Wasserdampf- und Kohlendioxidanfalls benötigt. Zur Bereitstellung von Planungsdaten wurden in den letzten Jahren hauptsächlich Fütterungsversuche aus Klimakammern ausgewertet. In Ergänzung zu diesen Untersuchungen wurden von uns kontinuierliche Messungen in sechs Milchviehställen durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten nach dem Prinzip der direkten Kalorimetrie. Die gemessenen Wärme- und Stoffströme, insbesondere die Wasserdampfproduktion, liegen über den in den Klimakammern ermittelten Werten. Daraus resultiert eine Verschiebung der Anteile an sensibler und latenter Wärme. Als Konsequenz ergibt sich eine Erhöhung der Luftrate im Winter.

1. Einleitung

Daten zum Wärme-, Wasserdampf- und Kohlendioxidanfall sind notwendige Grundlagen für die Auslegung der Wärmedämmung und der Lüftungseinrichtungen von Ställen sowie für die Planung von Wärmerückgewinnungsanlagen. Als Planungsgrundlagen dienen Daten, die in verschiedenen Einzeluntersuchungen gewonnen wurden und die für den Bereich Stallklima zum Teil in der Norm DIN 18910 [1] zusammengefaßt wurden. In der Fachwelt häuften sich jedoch in den letzten Jahren die Vermutungen, daß die Werte der Wärme-, Wasserdampf- und Kohlendioxidproduktion nicht den heutigen Produktionsbedingungen entsprechen, d.h. daß sie zu niedrig angesetzt sind.

Um die Datengrundlage zu verbessern, wurden von uns für die Planung von Wärmetauschern und Wärmepumpen Daten zum Wärme-, Wasserdampf- und Kohlendioxidanfall in Nutztierställen vorgeschlagen [2], die vornehmlich über den Erhaltungsbedarf und den Leistungsbedarf in der Fütterung der Tiere berechnet wurden. Ergänzt wurden diese Daten durch Ergebnisse, die aus kontinuierlichen Messungen in zwei Mast Schweineställen gewonnen wurden [3]. Hier sollen Ergebnisse mitgeteilt werden, die aus kontinuierlichen Messungen in sechs Milchviehställen resultieren.

2. Material und Methoden

Die zur Berechnung des Wärme-, Wasserdampf- und Kohlendioxidanfalls notwendigen Daten wurden mittels eines Computersystems mit einem 16-Kanal, 12-Bit-Analog/Digitalwandler erfaßt und aufgezeichnet.

Die Untersuchungen wurden in dankenswerter Weise durch die Arbeitsgemeinschaft für Elektrizitätsanwendung in der Landwirtschaft (AEL) finanziell unterstützt.

*) Dr. B. Schneider ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landtechnik der Universität Bonn (Direktor: Prof. Dr.-Ing. K.H. Kromer), Prof. Dr. W. Müller vertritt das Fachgebiet Tierhaltungs- und Tropenhygiene am Institut für Tiermedizin und Tierhygiene der Universität Hohenheim.

Zur Bestimmung der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit wurden selbstentwickelte Psychrometer verwendet, deren Genauigkeit mit der eines Assmann-Psychrometers vergleichbar ist. Die Trocken- und Feucht-Temperaturen der Zu- bzw. Abluft wurden mit Heißleiter-Temperatursensoren bestimmt. Zur Messung der relativen Luftfeuchtigkeit unter dem Gefrierpunkt wurde ein kapazitiver Feuchtesensor eingesetzt, der täglich nachgecheckt wurde. Aus den Kenndaten der Sensoren und dem verwendeten A/D-Wandler ergibt sich für die Bestimmung der relativen Luftfeuchtigkeit eine Meßunsicherheit von weniger als $\pm 2\%$.

Die Bestimmung der Kohlendioxidgehalte der Zu- und Abluft wurde mit Kohlendioxidanalysegeräten durchgeführt, deren Meßprinzip auf der molekülspezifischen Absorption von Banden der Infrarotstrahlung beruht.

Für die Messungen der Luftgeschwindigkeiten in den Abluftschächten wurde ein Flügelradanemometer verwendet.

Das Körpergewicht der Milchkühe und der Nachzucht wurde über Brustumfangsmessungen [4] bestimmt. Die durchschnittliche Milchleistung der Kühe wurde aus den Kontrollmessungen des jeweiligen Milchabnehmers bzw. aus den monatlich durchgeführten Milchleistungskontrollen des zuständigen Zuchtverbandes ermittelt.

Die Wärmeverluste durch die raumumschließenden Bauteile wurden nur bei den Messungen im Winter und bei Messungen in den Übergangszeiten berücksichtigt. Die Wärmeverluste durch die raumumschließenden Bauteile wurden nach den Vorgaben der derzeit gültigen DIN 18910 [1] durch Summierung der Wärmeverluste der Einzelbauteile berechnet. Bei den Messungen, die unter sommerlichen Bedingungen durchgeführt wurden, blieben die Transmissionswärmeströme unberücksichtigt.

Die Erfassung des Luftdurchsatzes erfolgte nach dem von Bähr u.a. [5] beschriebenen Nährungs- bzw. Netzverfahren. In rechteckigen Abluftkanälen wird beim Netzverfahren der Meßquerschnitt in eine ausreichende Zahl n von Feldern ($9 < n < 16$) eingeteilt, wobei die Felder in Randnähe kleiner gewählt werden. Die Messung erfolgt in den Flächenschwerpunkten aller Felder. In runden Meßkanälen wird beim Nährungsverfahren der Kreisquerschnitt in flächengleiche Kreisinge unterteilt. Die Meßpunkte liegen auf zwei senkrecht zueinander stehenden Symmetrieachsen.

In den Ställen, in denen ein Abluftkanal vorhanden war, wurden die Messungen saugseitig im Abluftkanal durchgeführt. In den Ställen, in denen kein Abluftkanal vorhanden war, wurden die Luftraten durch Geschwindigkeitsmessungen in einem 2 m langen Kanalstück, das vor die Abluftventilatoren gesetzt wurde, bestimmt. Der Luftstrom wurde, soweit dies die äußeren klimatischen Bedingungen zuließen, konstant gehalten.

Um bei den Untersuchungen in Ställen mit Milchkühen und Jungvieh die Wärme-, Wasserdampf- und Kohlendioxidströme getrennt für Milchkühe und Jungvieh berechnen zu können, wurden der Luftdurchsatz und die Wärmeverluste durch die raumumschließenden Bauteile (Q_B) anteilmäßig auf Milchkühe und Jungvieh aufgeteilt. Diese Aufteilung auf Milchkühe und Jungvieh erfolgte durch Berechnung der Wärmeproduktion nach Strøm u. Feenstra [6]. Bei der Berechnung der Wärmeleistung der Milchkühe aufgrund der Trächtigkeit wurde von einer mittleren Trächtigkeitsdauer von 140 Tagen ausgegangen.

Die Trocken- und Feuchttemperatur der Psychrometer sowie die Kohlendioxidkonzentration der Zu- und Abluft wurden kontinuierlich erfaßt (67–69 Messungen pro min). Alle 15 min wurden diese Einzelmessungen gemittelt und auf Datenträger gespeichert. Die gemittelten Werte wurden dann mit einem Ausleseprogramm verarbeitet und statistisch ausgewertet.

Als Grundgleichungen wurden berücksichtigt:

$$\begin{aligned} Q_{St} &= Q_B + Q_L \\ X_{St} &= X_L \\ K_{St} &= K_L \end{aligned}$$

Darin ist

- Q_{St} im Stall produzierte Wärme (W)
- Q_B durch raumumschließende Bauteile abfließende Wärme (W)
- Q_L durch die Lüftung abgeführte Wärme (W)
- X_{St} im Stall gebildete Wasserdampfmenge (g/h)
- X_L durch die Lüftung abgeführte Wasserdampfmenge (g/h)
- K_{St} im Stall gebildete Kohlendioxidmenge (l/h)
- K_L durch die Lüftung abgeführte Kohlendioxidmenge (l/h).

Für die Berechnung von Q_L , X_L , K_L und Q_B gilt:

$$\begin{aligned} Q_L &= \dot{m}_L (h_i - h_a) \\ X_L &= \dot{m}_L (x_i - x_a) \\ K_L &= \dot{m}_L (k_i - k_a) \\ Q_B &= k A (t_i - t_a) \end{aligned}$$

Mit:

- \dot{m}_L Luftmassenstrom (kg/h)
- $h_{i,a}$ spezifische Enthalpie (Wh/kg)
- $x_{i,a}$ Wasserdampfgehalt (Feuchtegrad) (g/kg)
- $k_{i,a}$ Kohlendioxidgehalt (l/kg)
- k Wärmedurchgangszahl (W/m² K)
- A Fläche (m²)
- $t_{i,a}$ Temperatur (°C)

Indizes

- i innen, Abluft
- a außen, Zuluft.

Für den Anfall an latenter Wärme Q_l im Stall gilt:

$$Q_l = (2500 + 1,884 t_i) X_{St}/1000 \quad (\text{kJ/h}).$$

Für die Berechnung des Anfalls an sensibler Wärme Q_s eines Stalles folgt dann:

$$Q_s = Q_{St} - Q_l.$$

Die untersuchten Ställe sind hinsichtlich Aufstallung und Tierbesatz wie folgt zu charakterisieren:

Stall A

- Aufstallung
 - Milchvieh: Liegeboxen, Laufbereich Spaltenboden
 - Jungvieh: Ganzspaltenboden
- Tierbesatz: insgesamt 74,2 GV
- 45 Milchkühe, ø Gew. 607 kg, ø Milchleistg. 11,6 kg/d
- 45 Stück Jungvieh, ø Gew. 217 kg

Stall B

- Aufstallung
 - Milchvieh: Liegeboxen, Laufbereich Spaltenboden
 - Jungvieh: Ganzspaltenboden
- Tierbesatz: insgesamt 70,0 GV
- 45 Milchkühe, ø Gew. 621 kg, ø Milchleistg. 11,2 kg/d
- 23 Stück Jungvieh, ø Gew. 306 kg

Stall C

- Aufstallung
 - Milchvieh: Liegeboxen, Laufbereich Spaltenboden
 - Jungvieh: Ganzspaltenboden
- Tierbesatz: insgesamt 75,7 GV
- 45 Milchkühe, ø Gew. 597 kg, ø Milchleistg. 14,3 kg/d
- 43 Stück Jungvieh, ø Gew. 255 kg

Stall D

- Aufstallung
 - Milchvieh: Anbindestall
 - Jungvieh: Ganzspaltenboden
- Tierbesatz: insgesamt 55,8 GV
- 30 Milchkühe, ø Gew. 603 kg, ø Milchleistg. 11,5 kg/d
- 33 Stück Jungvieh, ø Gew. 297 kg

Stall E

- Aufstallung
 - Milchvieh: Liegeboxen, Laufbereich planbefestigt
- Tierbesatz: insgesamt 77,4 GV
- 66 Milchkühe, ø Gew. 586 kg, ø Milchleistg. 13,5 kg/d

Stall F

- Aufstallung
 - Milchvieh: Anbindestall
 - Jungvieh: teilw. Spaltenboden, teilw. Einstreu
- Tierbesatz: insgesamt 31,5 GV
- 17 Milchkühe, ø Gew. 626 kg, ø Milchleistg. 11,7 kg/d
- 21 Stück Jungvieh, ø Gew. 244 kg.

3. Ergebnisse

In **Tafel 1** sind die Tagesdurchschnittswerte und die Standardabweichungen der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit der Zu- und Abluft sowie der Kohlendioxidkonzentration der Abluft dargestellt. Die Messungen in den Ställen A und B wurden im Sommer durchgeführt (Juli, August). Die Meßergebnisse in den Ställen C und D wurden in den Übergangsmonaten (September, Oktober und November) ermittelt. Die Messungen in den Ställen E und F wurden im Winter durchgeführt (Januar und Februar).

Stall	Zuluft				Abluft					
	Temp. °C		Feuchte %		Temp. °C		Feuchte %		CO ₂ Vol.-%	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
A	18,2	4,3	74	17	23,4	2,8	76	7	0,124	0,015
B	16,9	3,4	76	11	23,5	1,6	83	5	0,152	0,018
C	3,4	3,3	82	10	15,6	1,6	76	3	0,189	0,019
D	4,0	1,4	90	3	11,9	0,5	78	2	0,131	0,011
E	-1,7	0,9	90	3	12,2	0,4	87	2	0,185	0,012
F	-6,4	1,5	83	7	13,7	0,2	82	2	0,241	0,022

Tafel 1. Mittlerer Tagesdurchschnitt \bar{x} und Standardabweichung s der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit der Zu- und Abluft sowie der Kohlendioxidkonzentration der Abluft.

In **Tafel 2** sind die Tagesdurchschnittswerte der Wärmeproduktion mit Standardabweichung und die jeweiligen Anteile der sensiblen und latenten Wärme dargestellt. Im Mittel aller Messungen ergab sich für die Wärmeproduktion in den Milchviehställen bei einer durchschnittlichen Ablufttemperatur von 16,7 °C, einem durchschnittlichen Körpergewicht von 607 kg und einer mittleren Milchleistung von 12,3 kg/d ein Wert von 1251 W/Kuh. Für die durchschnittlich 264 kg schwere Nachzucht betrug die mittlere Wärmeproduktion 609 W/Kopf Jungvieh bei einer durchschnittlichen Ablufttemperatur von 17,6 °C.

Stall	Milchkühe				Jungvieh			
	Q _{St}		Q _s		Q _{St}		Q _s	
	\bar{x}	s	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	s	\bar{x}	\bar{x}
A	1221	139	406	815	529	60	176	353
B	1141	93	350	791	654	53	201	453
C	1336	131	742	594	617	61	343	274
D	1075	115	651	424	604	65	366	238
E	1371	47	798	573				
F	1363	115	843	520	639	54	396	243

Tafel 2. Mittlerer Tagesdurchschnitt \bar{x} und Standardabweichung s der Wärmeproduktion (Q_{St}) und Mittelwerte des Anfalls an sensibler (Q_s) und latenter Wärme (Q_l) in W/Kuh bzw. W/Kopf Jungvieh.

Im Durchschnitt fielen in den Rinderställen an Wasserdampf 907 g/h pro Kuh bzw. 458 g/h pro Kopf Jungvieh an, **Tafel 3**. Aus den einzelnen Untersuchungsergebnissen in den Milchviehställen kann ein linearer Zusammenhang zwischen dem Wasserdampfanfall und der Ablufttemperatur gefunden werden.

$$X = 221,83 + 40,99 t_i \quad (\text{g/h Kuh}) \quad (r^2 = 0,91)$$

Die mittlere Kohlendioxidproduktion betrug 223 l/h pro Kuh bzw. 111 l/h pro Kopf Jungvieh (**Tafel 3**).

Stall	Milchkühe				Jungvieh			
	X _{St}		K _{St}		X _{St}		K _{St}	
	x	s	x	s	x	s	x	s
A	1200	223	218	40	520	97	94	17
B	1165	81	193	29	667	46	110	17
C	868	62	256	28	401	29	118	13
D	617	72	238		347	40	134	
E	834	26	216	17				
F	758	71	214	35	355	33	100	16

Tafel 3. Mittlerer Tagesdurchschnitt x und Standardabweichung s des Wasserdampf- (X_{St}) und Kohlendioxidanfalls (K_{St}) pro Kuh bzw. Kopf Jungvieh in g/h bzw. l/h.

4. Besprechung der Ergebnisse

Die über alle sechs Untersuchungen in Milchviehställen ermittelte durchschnittliche Wärmeproduktion einer Milchkuh mit einem Körpergewicht von 607 kg und einer täglichen Milchleistung von 12,3 kg betrug 1251 W bei einer durchschnittlichen Stalltemperatur von 16,7 °C. Der Wert liegt damit um 19 % über dem nach *Strøm u. Feenstra* [6] zu berechnenden entsprechenden Wert von 1051 W/Kuh bzw. um 18 % über dem nach dem CIGR-Stallklimastandard [7] zu berechnenden Wert von 1057 W/Kuh.

Bei Untersuchungen von *Wolferrmann u. Hornig* [8], die in einem Milchviehstall unter Praxisbedingungen durchgeführt wurden, ergab sich ein Wert, der in der Nähe des hier ermittelten Wertes anzusiedeln ist (1140 W/Kuh mit 550 kg). Durch Extrapolation dieses Wertes ergibt sich für eine 607 kg schwere Kuh eine Wärmebildung von 1258 W, ein Wert, der mit der im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Wärmeproduktion nahezu identisch ist.

Rude [9] geht für die Planung von Wärmerückgewinnungsanlagen ebenfalls von einer durchschnittlichen Wärmeproduktion in ähnlicher Größenordnung (1200 W/600 kg Kuh) aus. Der entsprechende Wert der DIN 18910 [1] liegt mit 986 W/Kuh (600 kg, 10 °C) deutlich niedriger, ebenso der von *Hilliger* [10] ermittelte Durchschnittswert von 782 W/Kuh (609 kg).

Der in fünf Untersuchungsreihen gefundene Mittelwert der Tagesdurchschnittswerte der Wärmebildung der Nachzucht betrug 609 W/Tier mit einem durchschnittlichen Körpergewicht von 264 kg. Verfahrensbedingt liegt dieser Wert in der gleichen Größenordnung über dem entsprechenden Wert nach *Strøm u. Feenstra* [6] wie bei den Milchkühen. Im Vergleich zu dem entsprechenden Wert der DIN 18910 [1] liegt er nur um 8 % höher. Es sei jedoch angemerkt, daß das Zusammenfassen von Richtwerten des Wärme-, Wasserdampf- und Kohlendioxidanfalls von Milchkühen, Zuchtkälbern, Jungviehaufzucht, Jungviehmast, Mastbullen und Mastkälbern in der DIN 18910 eine unzulässige Vereinfachung darstellt, da die Energieumsätze der einzelnen Nutzungseinrichtungen sehr stark differieren. Ein derartiger Schluß ergibt sich aus der Auswertung der entsprechenden Literatur unter Zugrundelegung der bekannten Gleichungen für Grundumsatz, Erhaltungsbedarf und Leistungsumsatz.

Im Gegensatz zur Wärmeproduktion konnte bei den Durchschnittswerten des Wasserdampfanfalls in den Untersuchungen eine deutliche Temperaturabhängigkeit festgestellt werden. Für die Wasserdampfbildung eines Stalles ist naturgemäß eine Vielzahl von Faktoren verantwortlich. Die wichtigsten Quellen der Wasserdampfproduktion in belegten Ställen sind die Tiere und die feuchten Flächen.

In **Tafel 4** sind die Meßergebnisse den entsprechenden Werten, wie sie sich nach *Strøm u. Feenstra* [6] und nach der DIN 18910 [1] berechnen lassen, gegenübergestellt. Wie aus **Tafel 4** ersichtlich, liegen unsere Werte im Mittel mit 87 bzw. 82 % deutlich über den berechneten Werten nach *Strøm u. Feenstra*. Die Differenz ist dadurch erklärbar, daß die Untersuchungen, die der Arbeit von *Strøm u. Feenstra* zugrunde lagen, in Klimakammern durchgeführt wurden und somit nicht den Bedingungen einer intensiven Tierproduktion entsprachen. Die Wasserdampfbildung der anderen in Ställen vorhandenen Wasserdampfquellen und die damit verbundene Umwandlung von sensibler in latente Wärme blieben daher weitgehend unberücksichtigt.

Stall	Ablufttemp. °C	a		b		c	
		g/h		g/h		g/h	
		1	2	1	2	1	2
A	23,4	1200	520	650	282	453	230
B	23,5	1165	667	653	374	459	296
C	15,6	868	401	453	209	393	228
D	11,9	617	347	366	206	370	237
E	12,2	834		387		359	
F	13,7	758	355	398	187	383	209

Tafel 4. Wasserdampfanfall pro Kuh (1) und pro Kopf Jungvieh (2); a nach eigenen Messungen, b nach *Strøm u. Feenstra* [6], c nach DIN 18910 [1].

Die Werte für die Wasserdampfbildung nach der DIN 18910 liegen im Mittel sogar noch unterhalb der Werte von *Strøm u. Feenstra* und entsprechen somit ebenfalls nicht den tatsächlichen Gegebenheiten der Praxis. *Mothes u. Klink* [11] geben die von den feuchten Flächen eines

Stalles anfallenden Wasserdampfmengen bezogen auf die Abgabe latenter Wärme der Tiere mit 15 bis 100 % an, woraus ersichtlich ist, wie unterschiedlich hoch die nicht von den Tieren gebildete Wasserdampfmenge in Ställen sein kann.

Die von *Wolferrmann u. Hornig* [8] in einem Milchviehstall ermittelte Wasserdampfproduktion liegt ebenfalls mit 583 g/h (extrapoliert für eine 607 kg schwere Kuh) deutlich über den entsprechenden Werten von *Strøm u. Feenstra* und der DIN 18910.

Aus unseren Ergebnissen läßt sich mit Hilfe einer linearen Regression für den Wasserdampfanfall eine deutliche Temperaturabhängigkeit aufzeigen, da bei den einzelnen Untersuchungen die Tiere ähnliche Leistungsmerkmale aufwiesen. Um die Abhängigkeit des Wasserdampfanfalls von der Umgebungstemperatur unabhängig von den Leistungsmerkmalen aufzuzeigen, bietet es sich an, als Hilfsgröße den Quotienten Q_{St}/X_{St} in Abhängigkeit von der Temperatur darzustellen.

Wie aus **Bild 1** ersichtlich, ergibt sich eine gute Korrelation zwischen Stalltemperatur und dem Quotienten Q_{St}/X_{St} . Die Quotienten Q_{Ti}/X_{Ti} , berechnet nach den entsprechenden Werten von *Strøm u. Feenstra*, liegen im gesamten Bereich deutlich höher.

Die Veränderung der Quotienten wird zum überwiegenden Teil durch die höhere latente Wärmeabgabe bestimmt. Durch diese Art der Darstellung ist es möglich, die Wasserdampfbildung in Abhängigkeit von der Temperatur darzustellen, ohne daß die Faktoren Körpergewicht und tierische Leistung sowie die Lufrate Einfluß auf den Quotienten nehmen.

Auf einen Zusammenhang zwischen der Höhe der Wasserdampfproduktion und der unterschiedlichen Art der Aufstallungssysteme kann anhand der vorliegenden Meßergebnisse nicht geschlossen werden. Die Temperaturabhängigkeit des Wasserdampfanfalls im Stall bedingt einen mit steigender Temperatur vergrößerten Anteil der Wärme in latenter Form und eine damit verbundene Abnahme der sensiblen Wärme.

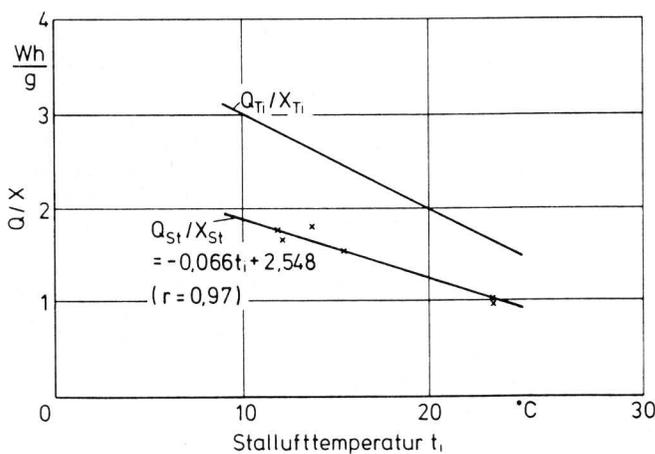


Bild 1. Quotient Q_{St}/X_{St} in Abhängigkeit von der Temperatur in Milchviehställen, zum Vergleich der entsprechende Quotient Q_{Ti}/X_{Ti} nach *Strøm u. Feenstra* [6].

Bild 2 zeigt die aus den Meßergebnissen abgeleiteten Anteile der in sensibler und latenter Form anfallenden Wärme in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Berechnung hierfür erfolgte über die entsprechenden Quotienten Q_{St}/X_{St} . Weiterhin sind im Bild die entsprechenden nach *Strøm u. Feenstra* berechneten Anteile der sensiblen und latenten Wärme mit und ohne Berücksichtigung des Korrekturfaktors k_s für die Abgabe sensibler Wärme nach CIGR-Stallklimastandard dargestellt. Dabei wurde von einem Wert von $k_s = 0,85$ ausgegangen.

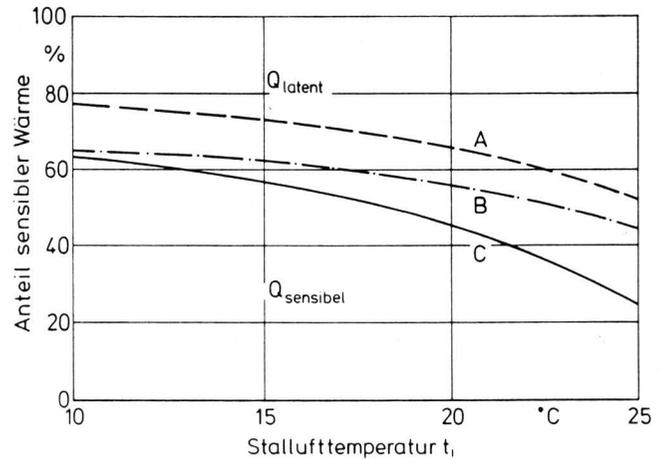


Bild 2. Prozentuale Anteile des Anfalls an sensibler und latenter Wärme in Milchviehställen in Abhängigkeit von der Temperatur.

A nach *Strøm u. Feenstra* ohne Berücksichtigung des Korrekturfaktors $k_s = 0,85$
 B nach *Strøm u. Feenstra* mit Berücksichtigung des Korrekturfaktors
 C nach eigenen Messungen

Wie aus **Bild 2** ersichtlich, liegt der aus den Meßergebnissen abgeleitete Anteil der sensiblen Wärme an der gesamten Wärmeproduktion bei 10 °C nur geringfügig (2,0 %) unterhalb des unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors k_s berechneten Anteils der sensiblen Wärme nach *Strøm u. Feenstra*.

Bekanntlich bestehen zwischen der im Stoffwechselgeschehen der Tiere anfallenden Wärme und dem dadurch bedingten Kohlendioxidanfall enge Gesetzmäßigkeiten. Nach *Kleiber* [12] fallen beim Abbau von Fett pro l Kohlendioxid 7,68 Wh an (Protein 6,51 Wh/l CO₂, Kohlenhydrate 5,82 Wh/l CO₂). Für die Bereitstellung von Planungsdaten für Stallklimaberechnungen wurde im CIGR-Stallklimastandard [7] davon ausgegangen, daß pro 100 Wh produzierter Wärme 16,3 l Kohlendioxid anfallen, was einem kalorischen Äquivalent von 6,13 Wh/l CO₂ entspricht. *Müller* [13] geht bei der Ermittlung von ausreichenden Lüftungsraten beim Flugtransport von Tieren von einem kalorischen Äquivalent von 7,65 Wh/l CO₂ aus und impliziert, daß die Tiere sich beim Transport im nüchternen Zustand befinden.

In den Milchviehställen ergab sich eine mittlere Kohlendioxidproduktion von 223 l/h pro Kuh, dies entspricht bei einer durchschnittlichen Wärmeproduktion von 1251 W pro Kuh einem kalorischen Äquivalent von 5,61 Wh/l CO₂. Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß diese kalorischen Äquivalente unter praxisrelevanten Bedingungen ermittelt wurden und die Berechnung von kalorischen Äquivalenten eine genaue Kenntnis des entsprechenden respiratorischen Quotienten voraussetzt, kann aus den Meßergebnissen der Kohlendioxidproduktion keine Unterteilung bezüglich deren Herkunft gemacht werden.

In vergleichbaren unter Praxisbedingungen durchgeführten Untersuchungen ermittelte *Hilliger* [10] für die Kohlendioxidproduktion mit 156 l/GVh einen Wert, der, extrapoliert auf 607 kg, mit 189 l/h um 34 l/h bzw. 18 % unter dem im Rahmen dieser Untersuchungen ermittelten Wert von 223 l/h liegt. Der entsprechende Wert der DIN 18910 [1] liegt mit 148 l/h (600 kg) ebenso unterhalb der ermittelten Kohlendioxidproduktion, wie auch der Wert, der sich über ein kalorisches Äquivalent von 6,13 Wh/l CO₂ aus der Wärmeproduktion nach *Strøm u. Feenstra* [6] berechnen läßt (171 l/h).

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde der in der DIN 18910 [1] als maximal zulässig genannte Wert für den Kohlendioxidgehalt der Stallluft von 0,35 Vol.-% zu keinem Zeitpunkt überschritten. Entsprechend gering ist somit nach den hier gewonnenen Erkenntnissen die Bedeutung des Kohlendioxidmaßstabs zur Bemessung der Winterlufrate eines Stalles. Diese Aussage findet auch in den hohen Werten der im

Rahmen dieser Arbeit ermittelten Wasserdampfproduktion ihre Bestätigung, die den Wasserdampfmaßstab zur Bestimmung der Winterluftfrate eindeutig favorisieren. An Bedeutung gewinnt die Kohlendioxidkonzentration in Ställen mit Wärmerückgewinnungsanlagen, wenn mit Umluftbetrieb gearbeitet wird. Durch die Kondenswasserbildung am Verdampfer können die Abluftfraten entsprechend gesenkt werden, was zu einer höheren Kohlendioxidkonzentration führt. Dies bestätigen auch Untersuchungen, die von Rude [14] mit unserer Unterstützung in einem Milchviehstall durchgeführt wurden. Es wurden in der Stallluft Kohlendioxidkonzentrationen von bis zu 1 Vol.-% gemessen, ohne daß die relative Luftfeuchtigkeit über 80 % anstieg.

Die Tagesverläufe der Wärmeproduktion zeigen deutlich den Einfluß der von Adam [15] beschriebenen Effekte, die das wärmetechnische Verhalten der raumumschließenden Bauteile auf die Wärmebildung eines Stalles unter sommerlichen Bedingungen ausüben. Die Verlaufskurven der Wasserdampfproduktion werden sehr stark vom Verlauf der Stalltemperatur beeinflusst. Die Verlaufskurven der Kohlendioxidproduktion werden ausschließlich von der Höhe der tierischen Aktivitäten bestimmt.

Für die Erstellung von Planungsdaten aus den Meßergebnissen wurde folgende Vorgehensweise gewählt: Die Meßergebnisse der Wärmeproduktion wurden unter Verwendung des entsprechenden Korrekturfaktors für die Temperatur F_T nach Strøm u. Feenstra [6] auf die in der DIN 18910 [1] für die einzelnen Tierarten angegebenen Rechenwerte für die Temperatur umgerechnet. Aus den korrigierten Werten wurde mittels einer Regressionsgleichung der Form:

$$Q_{Ti} = a m_{Ti}^{0,75}$$

mit:

Q_{Ti} Wärmeproduktion (W), m_{Ti} Tiergewicht (kg) und a Konstante, die Wärmeproduktion in Abhängigkeit vom Körpergewicht ermittelt. Der Wasserdampfanteil für die einzelnen Gewichtsklassen wurde unter Zuhilfenahme der im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Quotienten Q_{St}/X_{St} aus der Wärmeproduktion berechnet. Die Kohlendioxidproduktion wurde mit einem kalorischen Äquivalent von 6,13 Wh/l CO_2 aus den Werten der Wärmeproduktion ermittelt. Danach ergeben sich für die Wärme-, Wasserdampf- und Kohlendioxidproduktion die in **Tafel 5 und 6** angegebenen Daten.

Als Konsequenz aus den von den Meßergebnissen abgeleiteten Werten der Wärme-, Wasserdampf- und Kohlendioxidproduktion resultiert eine Erhöhung der Lüftungsraten im Winter, wenn – sinnvollerweise – der Wasserdampfmaßstab für die Lüftungsplanung verwendet wird.

Tiergewicht kg	Q_{St} W	Q_s W	Q_l W	X_{St} g/h	K_{St} l/h
400	924	588	336	489	151
500	1092	694	398	578	178
600	1252	796	456	663	204
700	1406	893	513	745	229

Tafel 5. Anfall von Wärme (Q_{St}), Wasserdampf (X_{St}) und Kohlendioxid (K_{St}) pro Kuh in Abhängigkeit vom Tiergewicht; Milchleistung 4500 l/Jahr, Trächtigkeitsdauer 140 Tage, Temperatur 10 °C, Luftfeuchte 80 %, $a = 10,33$, $Q_{St}/X_{St} = 1,888$.

Tiergewicht kg	Q_{St} W	Q_s W	Q_l W	X_{St} g/h	K_{St} l/h
200	497	316	181	263	81
300	674	428	246	357	110
400	836	531	305	443	136

Tafel 6. Anfall von Wärme (Q_{St}), Wasserdampf (X_{St}) und Kohlendioxid (K_{St}) pro Kopf Jungvieh in Abhängigkeit vom Körpergewicht; Temperatur 10 °C, Luftfeuchte 80 %, $a = 9,35$, $Q_{St}/X_{St} = 1,888$.

Durch die dadurch bedingten höheren Lüftungswärmeverluste ergibt sich aufgrund der im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Werte der Wärmebildung für die Erfüllung der in der DIN 18910 [1] vorgegebenen Rechenwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit bei kalten klimatischen Bedingungen schon bei höheren Außentemperaturen, als bisher angenommen, die Notwendigkeit zu stallklimaverbessernden Maßnahmen (Heizung, Wärmedämmung, Wärmerückgewinnung und Entfeuchtung). Die steigende Zahl solcher zwischenzeitlich getroffenen Maßnahmen, trotz angespannter Wirtschaftslage der Landwirtschaft, bestätigt diese Aussage.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] DIN 18910: Klima in geschlossenen Ställen. Berlin und Köln: Beuth Verlag GmbH, 1974.
- [2] Müller, W. u. B. Schneider: Zur Frage des Wärme-, Wasserdampf- und CO_2 -Anfalls in Milchvieh- und Schweinemastställen. 1. Mitteilung: Vorläufige Planungsdaten für den Einsatz von Wärmetauschern und Wärmepumpen in Nutztierställen. Tierärztl. Umschau Bd. 40 (1985) S. 274/80.
- [3] Schneider, B. u. W. Müller: Zur Frage des Wärme-, Wasserdampf- und CO_2 -Anfalls in Milchvieh- und Schweinemastställen. 2. Mitteilung: Ergebnisse kontinuierlicher Messungen des Wärme-, Wasserdampf- und CO_2 -Anfalls in zwei Schweinemastställen. Tierärztl. Umschau Bd. 40 (1985) S. 682/99.
- [4] Flanitzner, F.: Gewichtsentwicklung weiblicher Tiere im Feld im Vergleich zur Stationsprüfung über männliche Tiere zur Zuchtwertschätzung von Vätern auf Zuchtwertleistung. Diss. Wien 1968.
- [5] • Bähr, H., G. Schröder u. H.-U. Odin: Bauhygienische Meßmethoden. Angewandte Tierhygiene, Bd. 8. Jena: VEB Gustav Fischer Verlag, 1983.
- [6] Strøm, J.S. u. A. Feenstra: Wärmeabgabe bei Rindern, Schweinen und Geflügel. KTBL-Arbeitspapier 69, Darmstadt 1980.
- [7] CIGR-Stallklimastandard: Report of the working group on climatization of animal houses. Published by the Scottish Farm buildings Investigation Unit, Craibstone, Bucksburn, Aberdeen, AB2 9tr, Scotland 1984.
- [8] Wolfemann, H.F. u. J. Hornig: Ermittlung des Wasserdampf- und Wärmeanfalls in Rindvieh- und Schweinemastställen bei neueren Haltungsverfahren zur Ergänzung der DIN 18910. In: Stallklima und Geruchsbelästigung. KTBL-Schrift 171, Hiltrup: Landwirtschaftsverlag, 1973.
- [9] Rude, M.: Wärme aus dem Rinderstall zur Wohnhausbeheizung. DLG-Merkblatt 190, Frankfurt: Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft, 1981.
- [10] Hilliger, H.G.: Die Beurteilung von Lüftung und Wärmeschutz von Stallluftmerkmalen in einem massiven Milchvieh-Anbindestall unter wirtschaftlichen Verhältnissen. Habilitationsschrift FU Berlin 1968.
- [11] Mothes, E. u. G. Klink: Stallklima – Umweltanforderungen, Wärme-, Wasserdampf- und Gasabgabe der Tiere. Schriftenreihe Bauforschung, Reihe Landwirtschaftsbau Heft 9 (1969).
- [12] • Kleiber, M.: Der Energiehaushalt von Mensch und Haustier. Berlin und Hamburg: Paul Parey, 1967.
- [13] Müller, W.: Zur Frage ausreichender Lüftungsdaten beim Flugtransport von Tieren. 1. Mitteilung: Transport von Nutztieren. Schlachten und Vermarkten Bd. 79 (1979) S. 352/55.
- [14] Rude, M.: Wie beeinflussen Wärmepumpen das Stallklima? Landtechnik Bd. 42 (1987) S. 371/73.
- [15] Adam, M.: Untersuchungen über wärmetechnisches Verhalten der raumumschließenden Bauteile intensiv belüfteter Ställe. Diss. Univ. Hohenheim 1979.