

Lüftungstechnische und energetische Aspekte der Klimatisierung von Ställen im Winter

Von Gerhard Englert, Freising-Weihenstephan*)

Aus den Arbeiten des Sonderforschungsbereiches 141 "Produktionstechniken der Rinderhaltung"

DK 636.083.1:697

Erfahrungen aus der Praxis zeigen, daß es auch im Zeitalter modernster Technik ein Problem geblieben ist, in Ställen produktionsgerechte Klimaverhältnisse aufrechtzuerhalten. So kann man im Winter in Ställen immer wieder zu hohe Luftfeuchten, manchmal auch zu niedrige Temperaturen feststellen. Es wird zunächst gezeigt, daß sich diese Stallklimaprobleme als Folge der in der Praxis üblichen Lüftungssteuerungen (konstanter oder temperaturgesteuerter Lüftungsvolumenstrom) erklären lassen. Mit einer feuchtegesteuerten Lüftung und mit einer temperaturgesteuerten Heizung könnten konstante Feuchten und Temperaturen in einem Stall mit geringstem technischem Aufwand erreicht werden. Ein Problem dabei ist, neben der Feuchtemessung mit Feuchtefühlern, der hohe Heizenergiebedarf bei energieintensiven Ställen (z.B. für Mastkälber). Es wird dargestellt, daß sich dieser Heizenergiebedarf außer mit den technischen Maßnahmen Wärmedämmung und Wärmerückgewinnung auch damit deutlich vermindern läßt, daß man die Toleranzbereiche der Tiere bei der Festlegung der Sollwerte für die Feuchte und Temperatur der Stallluft ausnutzt.

1. Einleitung

Elemente des Stallklimas wie

- Temperatur,
- Zusammensetzung und
- Geschwindigkeit

der Stallluft sind wichtige Einflußgrößen jeder tierischen Produktion. Bild 1 zeigt dies an der Milchproduktion von Kühen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Ähnliche Versuchsergebnisse und Erfahrungen aus der Praxis führten zu Festlegungen

von Wertebereichen bzw. Grenzwerten für die verschiedenen Klimaelemente. Diese Anforderungen an das Stallklima von seiten der Tierhaltung sind in der Stallklima-Norm DIN 18910 [2] für die einzelnen Stallarten zusammengestellt. Tafel 1 enthält als Beispiel die Wertebereiche sowie Planungs-Rechenwerte für die Temperatur und relative Feuchte der Luft in einem Milchvieh- und einem Mastkälberstall. Weitere Anforderungen an das Stallklima ergeben sich daraus, daß ein Stall auch Arbeitsplatz des Menschen ist, sowie aus der Notwendigkeit, die Baustoffe und Bauteile im Stall vor länger andauernder hoher Luftfeuchte zu schützen. Diese könnte die Funktionsfähigkeit der Bausubstanz gefährden durch

- Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit, besonders von Wärmedämmstoffen,
- mikrobielle Zerstörung, z.B. von Holz sowie
- durch mechanische Schädigung beim Gefrieren des in Baustoffe eingedrungenen Wasserdampfes bzw. Wassers.

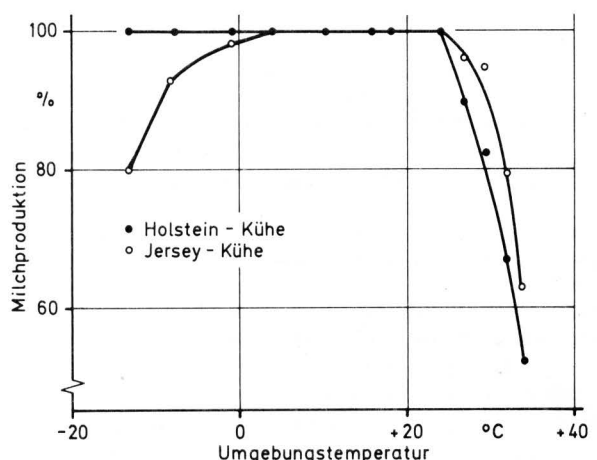


Bild 1. Milchproduktion von Kühen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur; nach Yeck u. Stewart [1].

*) Dipl. Phys. Dr. habil. G. Englert ist akademischer Oberrat an der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik, Freising-Weihenstephan.

Stall für	Lufttemperatur (°C)		Luftfeuchte (%)	
	Optimalbereich	Rechenwert im Winter	Optimalbereich	Rechenwert im Winter
Milchkühe	0–20	10	60–80	80
Mastkälber	16–20*	18	60–80	70

* Lufttemperatur mit zunehmendem Alter der Tiere allmählich abnehmend

Tafel 1. Leistungsorientierte Optimalbereiche und Planungs-Rechenwerte für die Temperatur und relative Feuchte der Stallluft nach DIN 18910 [2] bei verschiedenartiger Belegung.

Es müssen also insbesondere die relative Feuchte und die Temperatur in einem Stall auf Sollwerten bzw. innerhalb zulässiger Wertebereiche gehalten werden. Dies gelingt bei der Feuchte nur, wenn der Stall über eine Lüftung mit dem Außenraum in Verbindung steht. Die Tiere geben nämlich Wasserdampf und zudem Kohlendioxid sowie, über die Exkremente, Schadgase wie Ammoniak und Schwefelwasserstoff an die Stallluft ab. Die oberen Grenzwerte für diese Bestandteile der Stallluft wären sehr schnell überschritten, wenn nicht dem Stall mit einer Lüftung frische Außenluft zugeführt und die angereicherte Stallluft aus dem Stall abgeführt würde.

Da bei einer Durchlüftung des Stalles, die den Abtransport überschüssigen Wasserdampfes und damit einen ausgeglichenen Wasserdampfhaushalt sicherstellt, auch die Konzentrationen des Kohlendioxids und der Schadgase die zulässigen Grenzwerte nicht überschreiten, kann die Dimensionierung der Lüftung, d.h. die Festlegung der mit dem Außenraum auszutauschenden Luftmenge, nach dem Wasserdampfhaushalt erfolgen. Die in der DIN 18910 ebenfalls enthaltene Auslegung der Lüftung nach dem Kohlendioxidhaushalt ist nach Untersuchungen von Hilliger [3] überflüssig.

Um also die relative Feuchte in einem Stall konstant halten zu können, muß mit einer Lüftungssteuerung erreicht werden, daß der Wasserdampfhaushalt des Stalles bei den Veränderungen der Luftfeuchte im Außenraum ausgeglichen bleibt. Dies gelingt am einfachsten mit einer Feuchtesteuerung des Lüftungsvolumenstromes über Feuchtesteuerer. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß der Stall mit Ventilatoren zwangsbelüftet wird und so eine kontinuierliche (zumindest aber stufenweise) Veränderung des Lüftungsvolumenstromes möglich ist. Bei anderen Steuerungsarten wären im Winter technisch aufwendige Entfeuchtungsmaßnahmen notwendig.

In der Praxis läßt sich nun immer wieder beobachten, daß Ställe im Winter eine zu hohe Luftfeuchte haben, manchmal auch zu niedrige Temperaturen. Tropfende Decken und Wände sowie durchfeuchtete Bauteile sind dann keine Seltenheit und werden in den meisten Fällen falsch interpretiert. Wenn z.B. auf einer wärmedämmten Decke Wasserdampf zu Wassertropfen kondensiert, liegt es auch nur zu nahe, die Schuld dafür in einer schlechten Qualität des Dämmstoffes zu suchen. Oft sind Eingriffe des Landwirtes in das Lüftungssystem (z.B. Verschließen der Fortluftöffnungen) die Ursache für diese Stallklimaprobleme. In vielen Fällen können sie aber auch mit einer falschen Steuerung der Lüftung erklärt werden. Dies läßt sich zeigen, wenn man untersucht, wie sich die in der Praxis üblichen Lüftungssteuerungen (konstanter oder temperaturgesteuerter Volumenstrom) auf die Feuchte und Temperatur in Ställen auswirken.

Bei dieser Untersuchung ist zu beachten, daß die Lüftung auch die Stalltemperatur beeinflusst. Mit der Lüftung erfolgt nämlich ein Austausch von Wärmeenergie zwischen Stall und Außenraum und es kommt zu Temperaturänderungen, wenn die Wärmeenergiebilanz des Stalles nicht ausgeglichen bleibt. Die Bilanzierung der in einem Stall umgesetzten Wärmeenergien erlaubt es dann, zu be-

rechnen, welcher Energiebetrag im Winter aufgebracht werden muß, um die Wärmeenergiebilanz für eine konstante Stalltemperatur bei den Veränderungen der Außentemperaturen ausgeglichen halten zu können. Bei energieintensiven Ställen (z.B. für Mastkälber) ergeben sich dabei beachtliche jährliche Energiedefizite. Es wird nachgewiesen, daß sich diese deutlich vermindern, wenn man bei der Festlegung der Sollwerte für die Feuchte und Temperatur der Stallluft die Toleranzbereiche der Tiere ausnutzt. Man kommt so zu einer kostenneutralen Alternative zu den technischen Maßnahmen Wärmedämmung und Wärmerückgewinnung.

2. Berechnungsgrundlagen

2.1 Wasserdampfhaushalt

Der Wasserdampfhaushalt eines Stalles wird von folgender Bestimmungsgleichung für die Wasserdampf-Massenstromdifferenz $\Delta \dot{m}_W$ (in g/h) beschrieben:

$$\Delta \dot{m}_W = \dot{m}_{W,Ti} + \dot{m}_{W,St} + \dot{m}_{W,LZ} - \dot{m}_{W,LF} - \dot{m}_{W,B} \quad (1)$$

mit

- $\dot{m}_{W,Ti}$ von den Tieren ausgehender Wasserdampf-Massenstrom
- $\dot{m}_{W,St}$ beim Stallbetrieb (z.B. bei der Flüssigfütterung) anfallender Wasserdampf-Massenstrom
- $\dot{m}_{W,LZ(LF)}$ Wasserdampf-Massenstrom der Zuluft (LZ) bzw. Fortluft (LF)
- $\dot{m}_{W,B}$ Wasserdampf-Massenstrom durch die Bauteile der Stallhülle.

Die beiden Massenströme $\dot{m}_{W,St}$ und $\dot{m}_{W,B}$ bleiben bei den Berechnungen unberücksichtigt. Der Wasserdampf-Massenstrom durch den Stallbetrieb wird üblicherweise in die Rechenwerte für den von den Tieren ausgehenden Wasserdampf-Massenstrom einbezogen [2]. Der Wasserdampf-Massenstrom durch die Bauteile ist, wie sich zeigen läßt, vernachlässigbar klein. Für die übrigen Massenströme gelten die folgenden Bestimmungsgleichungen:

$$\dot{m}_{W,Ti} = \sum_j n_j \dot{m}_{W,Ti,j}(\vartheta_i) \quad (2)$$

$$\dot{m}_{W,LZ} = \dot{V}_L \frac{\rho_i(\vartheta_i, \varphi_i)}{\rho_a(\vartheta_a, \varphi_a)} x_a(\vartheta_a, \varphi_a) \quad (3)$$

$$\dot{m}_{W,LF} = \dot{V}_L x_i(\vartheta_i, \varphi_i) \quad (4)$$

mit

- $\dot{m}_{W,Ti,j}$ von einem Tier ausgehender Wasserdampf-Massenstrom (g/h)
- n_j Zahl der Tiere von der Art bzw. Altersgruppe j
- \dot{V}_L Volumenstrom der Lüftung (m^3/h)
- $x_{a(i)}$ Wassergehalt (in g/m^3) der Außenluft (a) bzw. Stallluft (i)
- ϑ_a, φ_a Temperatur (in °C) und relative Luftfeuchte (in %) im Außenraum
- ϑ_i, φ_i Temperatur (in °C) und relative Luftfeuchte (in %) im Stall
- $\rho_{a(i)}$ Dichte (in kg/m^3) der Außenluft (a) bzw. Stallluft (i).

Die Größe $\Delta \dot{m}_W$ verändert sich also mit der Temperatur und relativen Feuchte der Außenluft und Stallluft.

2.2 Wärmehaushalt, Wärmeenergie Defizit im Winter

Den Wärmehaushalt eines Stalles beschreibt, analog zu Gl. (1), die folgende Bestimmungsgleichung für die Wärmestromdifferenz $\Delta \dot{Q}$ (in W):

$$\Delta \dot{Q} = \dot{Q}_{Ti} + \dot{Q}_{St} + \dot{Q}_{LZ} - \dot{Q}_{LF} - \dot{Q}_B \quad (5)$$

mit

- \dot{Q}_{Ti} von den Tieren ausgehender Wärmestrom
- \dot{Q}_{St} beim Stallbetrieb entstehender Wärmestrom (z.B. durch die Beleuchtung)
- $\dot{Q}_{LZ(LF)}$ mit der Zuluft (LZ) bzw. Fortluft (LF) verbundener Wärmestrom
- \dot{Q}_B Wärmestrom durch die Bauteile der Stallhülle.

Der Wärmestrom \dot{Q}_{St} ist im Vergleich zu den anderen Wärmeströmen sehr klein und wird bei den Berechnungen vernachlässigt. Die übrigen Wärmeströme errechnen sich nach folgenden Bestimmungsgleichungen [2]:

$$\dot{Q}_{Ti} = \sum_j n_j \dot{Q}_{Ti,j}(\vartheta_i) \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{LZ} = \dot{V}_L \frac{\rho_i(\vartheta_i, \varphi_i)}{\rho_a(\vartheta_a, \varphi_a)} h_a(\vartheta_a, \varphi_a) \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{LF} = \dot{V}_L h_i(\vartheta_i, \varphi_i) \quad (8)$$

$$\dot{Q}_B = k_m A_{ges} (\vartheta_i - \vartheta_a) \quad (9),$$

mit

- A_{ges} Gesamtfläche der Bauteile der Stallhülle (m^2)
- $h_{a(i)}$ spezifische Enthalpie (in Wh/m^3) der Außenluft (a) bzw. Stallluft (i)
- k_m mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient der Bauteile (W/m^2K)
- $\dot{Q}_{Ti,j}$ von einem Tier ausgehender Wärmestrom (W).

Die Wärmestromdifferenz $\Delta\dot{Q}$ ist damit ebenfalls eine Funktion der Temperatur und der relativen Feuchte von Außenluft und Stallluft.

Das im Winter bestehende Defizit in der Wärmeenergiebilanz des Stalles ΔQ (in $Wh/Jahr$) läßt sich nach einem in [4] angegebenen Verfahren unter Verwendung von Häufigkeitsverteilungen der Außentemperatur $t(\vartheta_a)$ mit folgender Gleichung berechnen:

$$\Delta Q = \sum_{\vartheta_{a,u} \leq \vartheta_a = \vartheta_{a,o}} \Delta\dot{Q}(\vartheta_a) t(\vartheta_a) \quad (10),$$

mit

- $t(\vartheta_a)$ mittlere Zahl der Stunden pro Jahr mit einer Außentemperatur ϑ_a
- $\vartheta_{a,u}$ untere Grenztemperatur (in $^{\circ}C$) mit $t(\vartheta_a) = 0$
- $\vartheta_{a,o}$ obere Grenztemperatur (in $^{\circ}C$) mit ausgeglichenem Wärmehaushalt ($\Delta\dot{Q} = 0$).

Es ist zu beachten, daß die beiden Bilanzierungsgleichungen (1) und (5) die Verhältnisse in der Praxis nur modellhaft wiedergeben. So wird der zusätzliche, unkontrollierte Luftaustausch und damit Austausch von Wasserdampf und Wärmeenergie über Undichtigkeiten der Stallhülle nicht berücksichtigt, weil er sehr schwer zu quantifizieren und zudem noch von Stall zu Stall unterschiedlich groß ist. Bei den Berechnungen des Bilanzdefizits werden weiterhin stationäre Verhältnisse vorausgesetzt, wie an der Bestimmungsgleichung für die stationäre Wärmeleitung Gl. (9) zu ersehen ist. In Wirklichkeit sind aber wegen der Temperatur- und Feuchteschwankungen der Außenluft instationäre Verhältnisse gegeben, die sich wegen der Wärme- und Feuchtespeicherung in Trägheitseffekten vor allem beim Wärme- und Wasserdampfdurchgang durch die Bauteile der Stallhülle bemerkbar machen würden. Der Wasserdampf-Volumenstrom $\dot{m}_{W,B}$ wird jedoch sowieso vernachlässigt, beim Wärmestrom \dot{Q}_B mitteln sich die Trägheitseffekte über längere Zeiträume hinweg aus [5]. Bei der Berechnung des Wärmeenergie-defizits wird aber gerade über längere Zeiträume gemittelt, da die Häufigkeitsverteilungen der Außentemperatur mittlere Stunden-zahlen über einen Zeitraum von mehreren Jahren beinhalten.

2.3 Rechenverfahren

Bei der Untersuchung, wie sich die beiden in der Praxis üblichen Lüftungssteuerungen auf die Temperatur und Feuchte im Stall bei veränderlicher Außentemperatur (für die Außenfeuchte wird ein konstanter Wert $\varphi_a = 80\%$ angenommen) auswirken, kam folgendes Rechenverfahren zur Anwendung:

Durch Nullsetzen der Wasserdampf-Massenstromdifferenz in Gl. (1) und der Wärmestromdifferenz in Gl. (5) erhält man zunächst einmal die Bestimmungsgleichungen für die Temperatur ϑ_i und relative Feuchte φ_i im Falle des konstanten Winter-Lüftungsvolumenstroms sowie für die relative Feuchte φ_i und den Lüftungsvolumenstrom \dot{V}_L bei einem temperaturgesteuerten Lüftungsvolumenstrom ($\vartheta_i = \text{const}$).

Im ersten Untersuchungsfall wird dann die Temperatur ϑ_i , im zweiten der Lüftungsvolumenstrom \dot{V}_L variiert, bis die Wärmestrombilanz ausgeglichen ist. Die relative Feuchte φ_i geht über die Bedingung $\Delta\dot{m}_W = 0$ in die Berechnungen ein. Für beide Rechenverfahren wurden EDV-Programme erstellt.

Die Bestimmung der Wärmeenergie-defizite, also des Heizenergiebedarfs bei der Feuchtesteuerung der Lüftung erfolgte ebenfalls mit einem EDV-Rechenprogramm. In die Berechnungen geht der Lüftungsvolumenstrom $\dot{V}_{L,\varphi}(\vartheta_a)$ ein, der bei veränderlicher Außentemperatur zu einem ausgeglichenen Wasserdampfhushalt führt, sich also aus der Bedingung $\Delta\dot{m}_W = 0$ bestimmen läßt.

2.4 Berechnungsannahmen

Als Berechnungsbeispiele wurden die Belegung eines Modellstalles mit Milchkühen sowie mit Mastkälbern ausgewählt. Die in den Beispielen verwendeten Tierzahlen und -massen sind in **Tafel 2** zusammengestellt. Die Auswahl dieser Nutzungsarten begründet sich damit, daß ein Milchviehstall weitgehend energieautark ist, d.h. daß die von den Tieren erzeugte Wärme auch bei tieferen Außentemperaturen ausreicht, die Wärmeverluste über Lüftung und Stallhülle auszugleichen. Bei einem Mastkälberstall dagegen besteht ein beträchtlicher Heizenergiebedarf [4].

Stall für	Tierzahl	Tiermasse kg	$\dot{Q}_{Ti,j,ges,o}^*$ W
Milchkühe	48	600	1242
Mastkälber	160	100	228

*) Unkorrigierte Gesamtwärmeabgabe je Tier

Tafel 2. Rechenwerte bei unterschiedlicher Nutzung des Modellstalles.

Für die Temperaturabhängigkeit des Wärmestromes bzw. Wasserdampf-Volumenstromes der Tiere wurden die von *Strøm* u. *Feenstra* [6] angegebenen Beziehungen übernommen.

$$\dot{Q}_{Ti,j}(\vartheta) = f_1(\vartheta) f_2(\vartheta) \dot{Q}_{Ti,j,ges,o} \quad (11)$$

$$\dot{m}_{W,Ti,j}(\vartheta) = 1,47 f_1(\vartheta) [1 - f_2(\vartheta)] \dot{Q}_{Ti,j,ges,o} \quad (12),$$

mit

$$\begin{aligned} f_1(\vartheta) &= 1 + 10^{-5} (20 - \vartheta)^3 \\ f_2(\vartheta) &= 0,8 - 1,85 \cdot 10^{-7} (\vartheta + 10)^4 \end{aligned} \quad (13).$$

Die aus [6] entnommenen Werte für die unkorrigierte Gesamtwärmeabgabe $\dot{Q}_{Ti,j,ges,o}$ enthält ebenfalls **Tafel 2**. Mit diesen Werten errechnen sich die in **Bild 2** dargestellten Abhängigkeiten der Größen $\dot{Q}_{Ti,j}$ und $\dot{m}_{W,Ti,j}$ von der Temperatur.

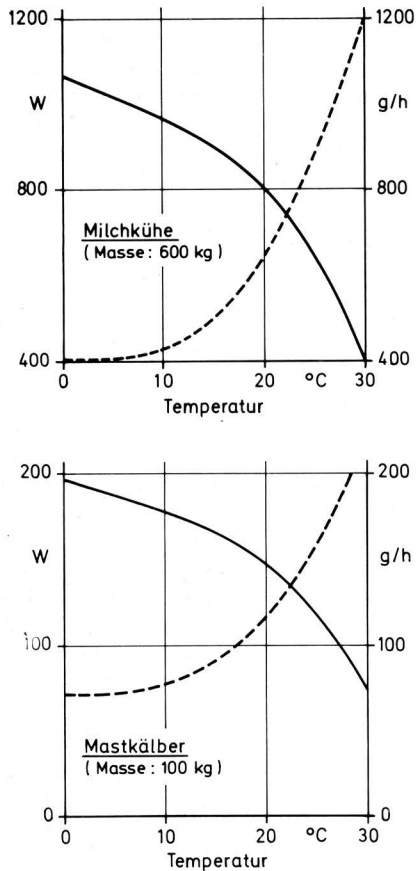


Bild 2. Wärme- und Wasserdampfanfall von Rindern in Abhängigkeit von der Temperatur; nach *Strøm u. Feenstra* [6].
 --- Wasserdampf-Massenstrom (g/h Tier)
 — Wärmestrom (W/Tier)

Der Modellstall ist durch folgende Rechenwerte charakterisiert:

$$A_{\text{ges}} = 630 \text{ m}^2 \text{ (Abmessungen: } 30 \times 12,5 \times 3 \text{ m)}$$

$$k_m = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K (Belegung mit Milchkühen)}$$

$$= 0,4 \text{ W/m}^2\text{K (Belegung mit Mastkälbern).}$$

Der konstante Winter-Lüftungsvolumenstrom ergibt sich nach DIN 18910 aus der Bestimmungsgleichung für einen ausgeglichenen Wasserdampfhaushalt für bestimmte, für den Winter charakteristische Außentemperaturen, die in der DIN 18910 für die einzelnen Klimagebiete vorgegeben sind. Für das bei den Berechnungen behandelte Klimagebiet München gilt ein Außentemperatur-Rechenwert von $-14 \text{ }^\circ\text{C}$. Die bei der Berechnung des Wärmeenergie-defizits benötigte Häufigkeitsverteilung der Außentemperatur für den Standort München-Riem wurde vom Deutschen Wetterdienst aus Temperaturmessungen im Zeitraum 1951–1970 errechnet [4].

Für die Luftzustandsgrößen Dichte, Wassergehalt und spezifische Enthalpie standen Bestimmungsgleichungen nach [7] zur Verfügung, wobei die Abhängigkeit des Sättigungsdruckes von der Temperatur mit den ebenfalls in [7] angegebenen Näherungsgleichungen beschrieben wird.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Veränderung der Temperatur und Feuchte der Stallluft mit der Außentemperatur

Wie sich die Temperatur und Feuchte der Stallluft bei der Lüftung mit dem konstanten Winter-Volumenstrom (Mindestlüftung nach DIN 18910) mit der Außentemperatur verändern, ist in **Bild 3** und **4** dargestellt. **Bild 3** zeigt, daß die Stalltemperaturen bei der Belegung mit Mastkälbern im Außentemperaturbereich unterhalb

$-2 \text{ }^\circ\text{C}$ den unteren Grenzwert (Grenzwert für ältere Kälber) nach DIN 18910 von $16 \text{ }^\circ\text{C}$ unterschreitet, während der Grenzwert der Stalltemperatur von $0 \text{ }^\circ\text{C}$ bei der Belegung mit Milchkühen erst bei einer Außentemperatur von $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht wird.

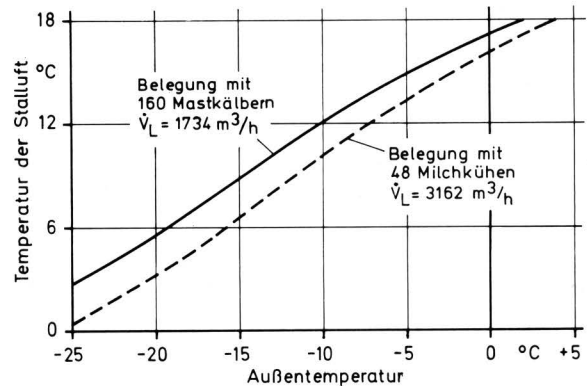


Bild 3. Stallluft-Temperatur als Funktion der Außentemperatur bei Mindestlüftung nach DIN 18910; Standort: München.

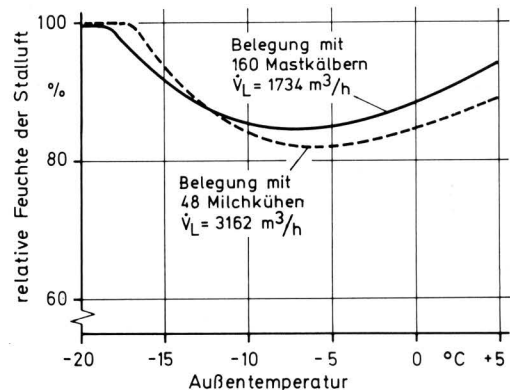


Bild 4. Relative Feuchte der Stallluft als Funktion der Außentemperatur bei Mindestlüftung nach DIN 18910; Standort: München.

Die relative Feuchte der Stallluft überschreitet nach **Bild 4** bei beiden Nutzungsarten des Stalles den oberen Grenzwert von 80% im gesamten Außentemperaturbereich. Feuchten über 90% sind für Außentemperaturen unterhalb $-13 \text{ }^\circ\text{C}$ (Milchkühe) bzw. $-14 \text{ }^\circ\text{C}$ (Mastkälber) zu erwarten. Die Zunahme der Feuchte in der Stallluft bei Außentemperaturen oberhalb von etwa $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ erklärt sich daraus, daß der konstante Winter-Lüftungsvolumenstrom in diesem Bereich kleiner ist, als zum Ausgleich des Wasserdampfhaushaltes erforderlich wäre. Dies ergibt sich klarer aus der Darstellung der Lüftungsvolumenströme in Abhängigkeit von der Außentemperatur in **Bild 5**.

Die Veränderung der relativen Feuchte der Stallluft mit der Außentemperatur bei temperaturgesteuertem Lüftungsvolumenstrom zeigt **Bild 6**. Bei der Belegung des Modellstalles mit Mastkälbern ist die Stallluft im gesamten Außentemperaturbereich unter $+5 \text{ }^\circ\text{C}$ feuchter als nach DIN 18910 zulässig. Feuchten über 90% werden schon bei $+2 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht. Bei der Belegung mit Milchkühen treten Feuchten über 80% erst unterhalb von ca. $-9 \text{ }^\circ\text{C}$ auf, Feuchten von 90% und mehr unterhalb von $-12 \text{ }^\circ\text{C}$.

Es ist somit festzuhalten, daß die in Ställen im Winter bzw. in den Übergangszeiten angewandte Steuerung der Lüftung auf einen konstanten Volumenstrom vor allem zu unzulässig hohen Feuchten der Stallluft führt. Bei dem energieintensiven Mastkälberstall

bewirkt die Winterlüftung mit einem konstanten Lüftungsvolumenstrom außerdem schon bei Außentemperaturen ab dem Gefrierpunkt eine unzulässig große Temperaturabsenkung.

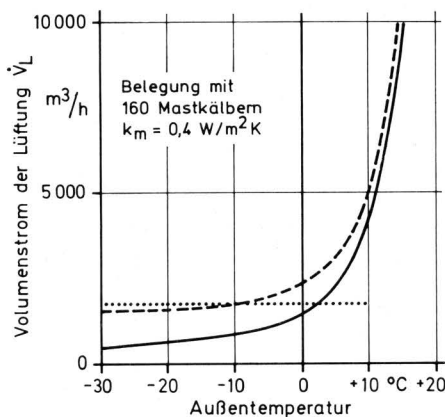
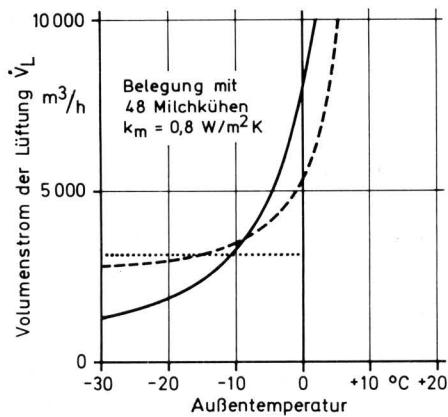


Bild 5. Volumenstrom der Lüftung in Abhängigkeit von der Außentemperatur bei unterschiedlicher Lüftungssteuerung; Standort: München.

— Temperatursteuerung
 - - - - - Feuchtesteuerung
 Mindestlüftung im Winter nach DIN 18910

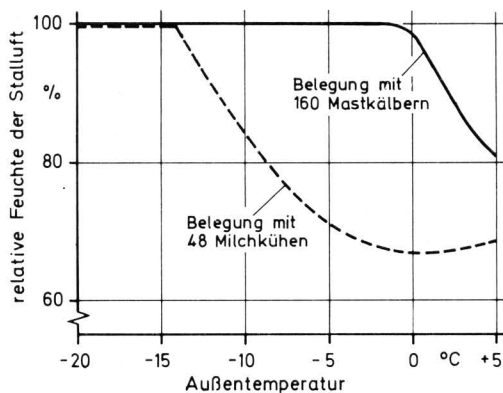


Bild 6. Relative Feuchte der Stallluft in Abhängigkeit von der Außentemperatur bei Steuerung des Lüftungsvolumenstromes nach der Temperatur; Standort: München.

Man könnte nun zu der Überzeugung kommen, daß diese Stallklima-probleme nicht überbewertet werden sollten, weil die Außentemperatur bzw. Außenfeuchte nur in wenigen Stunden eines Jahres die für das Stallklima kritischen Grenzwerte (Besprechung von Bild 3, 4, 6) unter- bzw. überschreitet. Die in **Tafel 3** zusammengestellten, diesen Grenzwerten zugeordneten Stundenzahlen zeigen, daß diese Überzeugung bei dem Milchviehstall einigermaßen gerechtfertigt ist, nicht aber beim Mastkälberstall. Der konstante Winter-Lüftungsvolumenstrom bewirkt hier, daß die Stalltemperatur über einen Zeitraum von ca. 1 100 h/Jahr zu niedrig ist.

Bei einem temperaturgesteuerten Lüftungsvolumenstrom ist mit Luftfeuchten von mehr als 90 % sogar über einen Zeitraum von etwa 1/3 eines Jahres zu rechnen. Hier könnte nur eine Entfeuchtung der Stallluft, eine technisch aufwendige Maßnahme, zu einem tier- und produktionsgerechten Stallklima führen. Eine einfachere Lösung ist allerdings die Feuchtesteuerung des Lüftungsvolumenstromes, wobei entstehende Defizite in der Wärmeenergiebilanz des Stalles sich mit einer temperaturgesteuerten Heizung leicht ausgleichen lassen.

Diese Feuchtesteuerung der Lüftung scheiterte bisher an geeigneten Feuchtefühlern, die ausreichend langzeitstabil sein müssen. Nach Erfahrungen von *Leuschner* [8] ist die Feuchtesteuerung des Lüftungsvolumenstromes mit hygroskopischen Feuchtefühlern bei Einsatz der elektronischen Datenverarbeitung in der Meßwert-erfassung und -verarbeitung möglich.

Stall für	$\vartheta_{i,G}^{1)}$ °C	oberer Grenzwert des Außentempe- raturbereiches, in dem $\vartheta_i < \vartheta_{i,G}$ °C	mittlere Zahl der Stunden pro Jahr mit $\vartheta_i < \vartheta_{i,G}$ h/Jahr	oberer Grenzwert des Außentempe- raturbereiches, in dem $\varphi > 80\% \mid \varphi > 90\%$ °C	mittlere Zahl der Stunden pro Jahr mit $\varphi > 90\%$ h/Jahr
Milchkühe	WL	- 26	1	*	- 14
	TL	—	—	- 9	- 12
Mastkälber	WL	- 3	1093	*	- 15
	TL	—	—	+ 5	+ 2

1) Grenzwert nach DIN 18910
 WL Mindestlüftung im Winter
 TL Temperaturgesteuerte Lüftung

2) Grenzwert für ältere Tiere
 * im gesamten untersuchten
 Außentemperaturbereich

Tafel 3. Grenzwerte und zugeordnete mittlere Zahl der Stunden im Jahr für den Außentemperaturbereich mit unzulässigen Temperaturen und relativen Feuchten der Stallluft; Standort: München.

3.2 Abhängigkeit des Wärmeenergie-defizits im Winter von den Sollwerten der Temperatur und Feuchte der Stallluft

Bei der Feuchtesteuerung der Lüftung treten bei energieintensiven Ställen im Winter beachtliche Defizite in der Wärmeenergiebilanz auf. So errechnet sich für den gut wärmege-dämmten Modellstall ($k_m = 0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$) bei Belegung mit 160 Mastkälbern ein Defizit von 25,6 MWh/Jahr, wenn die Planungs-Rechenwerte der DIN 18910 (s. Tafel 1) als Sollwerte für die Temperatur und Feuchte der Stallluft festgelegt sind. Bei einem Energiepreis auf Heizölbasis von etwa 75 DM/MWh ergeben sich damit jährliche Kosten in Höhe von 1920 DM zum Ausgleich des Defizits.

Als Möglichkeiten zur Verringerung dieses Wärmeenergie-defizits kommen zunächst einmal eine weitere Verbesserung der Wärme-dämmung sowie die Erwärmung der Zuluft durch die Fortluft in einem Wärmetauscher in Frage. Wie weit bzw. ob diese technischen Maßnahmen sinnvoll sind, entscheidet letztendlich eine Wirtschaft-lichkeitsprüfung [9]. Nicht übersehen werden sollte aber, daß auch durch eine betriebliche Maßnahme eine deutliche Verkleine-rung des Wärmeenergie-defizits möglich ist.

Dies zeigt **Bild 7**, in dem dargestellt ist, wie sich das jährliche Wärmeenergiedefizit in Abhängigkeit von verschiedenen Sollwerten für die Temperatur und Feuchte der Stallluft verändert. So ergibt sich für die relative Feuchte $\varphi_i = 80\%$ (Grenzwert nach DIN 18910, s. Tafel 1) bei unveränderter Temperatur ($\vartheta_i = 18\text{ °C}$) ein Defizit von nur 11,7 MWh/Jahr, also von 46 % des Wertes, der sich für $\varphi_i = 70\%$ (Rechenwert im Winter) errechnet. Das Ausnutzen der Toleranzbereiche der Tiere bei der Festlegung der Sollwerte für die Temperatur und Feuchte der Stallluft ist damit eine wirksame und gleichzeitig kostenfreie Möglichkeit der Energieeinsparung bei energieintensiven Ställen.

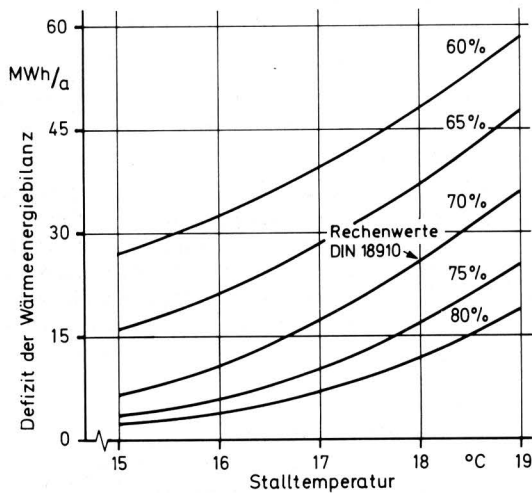


Bild 7. Wärmedefizit als Funktion der Stalltemperatur mit der Feuchte der Stallluft als Parameter; Belegung mit Mastkälbern, Standort: München.

4. Zusammenfassung

Ausgehend von den Bilanzierungsgleichungen für den Wasserdampf- und Wärmehaushalt eines Stalles wurde zunächst an den Veränderungen der Temperatur und Feuchte der Stallluft mit der Außentemperatur gezeigt, daß die in der Praxis übliche Winterlüftung mit einem konstanten Lüftungsvolumenstrom (nach DIN 18910) bei dem energieintensiven Mastkälberstall vor allem zu einer unzulässig großen Temperaturabsenkung führt.

Bei einem weitgehend energieautarken Stall dagegen ermöglicht diese Lüftungsart, außer bei extrem tiefen Außentemperaturen, ein tiergerechtes Stallklima, wie die Berechnungen für einen Milchviehstall ergaben.

Die in den Übergangszeiten Herbst und Frühjahr übliche Temperatursteuerung des Lüftungsvolumenstromes führt beim Mastkälberstall zu einer hohen Luftfeuchte über einen langen Zeitraum, während sie beim Milchviehstall den Anforderungen an das Stallklima weitgehend gerecht wird.

Besonders bei energieintensiven Ställen (z.B. für Mastkälber, Sauen mit Ferkeln) ist damit die Feuchtesteuerung der Lüftung für ein tier- und betriebgerechtes Stallklima unabdingbar. Die dann im Winter gegebenenfalls hohen Defizite im Wärmehaushalt dieser Ställe bzw. der zum Ausgleich dieser Defizite notwendige hohe Heizenergieverbrauch lassen sich deutlich vermindern, wenn man die Toleranzbereiche der Tiere in bezug auf die Feuchte bzw. Temperatur im Stall ausnutzt und etwas höhere Feuchten bzw. niedrigere Temperaturen als Sollwerte zuläßt.

Schrifttum

- [1] *Yeck, R.G. u. A. Stewart:* A ten years summary of the psychro-energetic laboratory dairy cattle research of the University of Missouri. Trans. ASAE Vol. 2 (1959) Nr. 1, S. 71/77.
- [2] *DIN 18910:* Klima in geschlossenen Ställen – Wasserdampf- und Wärmehaushalt im Winter, Lüftung, Beleuchtung. Berlin: Beuth Vertrieb GmbH, 1974.
- [3] *Hilliger, H.G.:* Kohlendioxid in der Stallluft. KTBL-Arbeitspapier 83, Darmstadt: KTBL 1983.
- [4] *Englert, G.:* Ein Rechenmodell für die Wärmeenergiebilanz von Ställen. Grndl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 5, S. 170/74.
- [5] *Heindl, W.:* Zum instationären Verhalten von Wärmebrücken. Bauphysik Bd. 4 (1982) Nr. 4, S. 145/46.
- [6] *Strøm, J.S. u. A. Feenstra:* Wärmeabgabe bei Rindern, Schweinen und Geflügel. KTBL-Arbeitspapier 69, Darmstadt: KTBL 1980.
- [7] *Janssen, J. u. F. Schoedder:* Ableitung von Luftzustandsgrößen aus meteorologischen Daten. Grndl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 3, S. 81/90.
- [8] *Leuschner, P.:* Neue Regelsysteme bei der Zwangslüftung. Freising: Referateband des Weihenstephaner Baugesprächs 1982, Landtechnik Weihenstephan 1982, S. 55/65.
- [9] *Englert, G.:* Zur Wirtschaftlichkeitsprüfung des Einsatzes von Luft/Luft-Wärmetauschern in Ställen. Grndl. Landtechnik Bd. 33 (1983) Nr. 4, S. 90/97.