

Zu Fragen der Anpassung lüftungs- und wärmetechnischer Berechnungsgrundlagen für Stallgebäude an technische Regelwerke der Klimatechnik

KARL - LUDWIG BORCHERT

Institut für landwirtschaftliche Bauforschung

Einleitung

Lüftungs- und wärmetechnische Berechnungen für Hochbauten werden überwiegend nach Normen, Standards oder sonstigen technischen Regelwerken durchgeführt, in denen die entsprechenden Berechnungsgrundlagen und -verfahren festgelegt sind. Für die Bemessung der Wärmedämmung und Lüftung von Stallgebäuden wurde 1963 die Norm DIN 18910 "Klima in geschlossenen Ställen" in der Bundesrepublik Deutschland eingeführt. Sie ist in der überarbeiteten Fassung von 1974 bis heute noch gültig. Eine weitere Überarbeitung dieser Norm wurde 1987 als Entwurf veröffentlicht [9].

Die DIN 18910 ist die wichtigste, speziell für das landwirtschaftliche Bauwesen herausgegebene Norm. Sie gilt für die Planung geschlossener, wärmegeämmter Nutztierställe und dient als Baunorm vorrangig der Bemessung des Wärmeschutzes der Gebäude. Zugleich sollen mit diesen Maßnahmen günstige Umweltbedingungen für die Tiere und günstige Arbeitsplatzbedingungen für den im Stall tätigen Menschen geschaffen sowie Bauschäden vermieden werden.

Der Bemessung des Wärmeschutzes und der heiztechnischen Anlagen von Gebäuden muß eine Berechnung der erforderlichen Raumlüftung und des damit verbundenen Wärmebedarfs zur Erwärmung des Zuluftstromes im Winter vorausgehen. Zur Bemessung der Lüftungseinrichtungen eines Gebäudes kann daneben der Luftvolumen- oder -massenstrom zu bestimmen sein, der zur Abführung von Wärme im Sommer erforderlich ist. Insofern sind die wärme- und lüftungstechnischen Berechnungen zur Planung von Stallgebäuden oder von Wohn- und Verkehrsgebäuden für Menschen gleich. Unterschiedlich sind lediglich die Berechnungsannahmen aufgrund der speziellen Anforderungen an das Raumklima und der jeweiligen Raumnutzungen. Trotz gleichartiger Aufgabenstellungen weichen die Berechnungsverfahren nach DIN 18910 teilweise erheblich von den Normen und Richtlinien für Wohn-, Verkehrs- oder Industriebauten ab, was immer wieder Anlaß zu Diskussionen gibt.

Da die Norm DIN 18910 auch für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen hinsichtlich der Energie- und Baukosten Verwendung findet, sind möglichst genaue, aber dennoch übersichtliche Unterlagen zur Planung des Wärmeschutzes, der Lüftungs-, Heizungs- und Wärmerückgewinnungsanlagen von Stallgebäuden erforderlich.

Es soll daher der Frage nachgegangen werden, ob die besonderen Berechnungsgrundlagen und -verfahren nach DIN 18910 richtig und gerechtfertigt sind und ob eine Harmonisie-

rung der im Hochbau gebräuchlichen Regelwerke zwecks Vereinfachung wärme- und lüftungstechnischen Berechnungen möglich ist.

Problemstellung

Beim Bau wärmegeämmter Ställe soll die Wärmedämmung der raumumschließenden Bauteile möglichst so ausreichend bemessen sein, daß die Wärmeabgabe der Tiere ganz oder überwiegend ausreicht, um den Transmissions- und Lüftungswärmebedarf der Ställe im Winter zu decken. Nur wenn die tierische Heizleistung dafür zu gering ist, ist eine Zusatzheizung vorzusehen. Im Stallbau wird somit der Wärmeschutz der Gebäude vorrangig nach der vorgegebenen Heizleistung der Tiere bemessen. Im Wohnungs- und Industriebau verfährt man in umgekehrter Weise. Hier werden die heiztechnischen Anlagen nach dem jeweiligen Transmissions- und Lüftungswärmebedarf eines Gebäudes bemessen.

Der Wärmeschutz der Stallgebäude wie auch die Leistung der Stalllüftungseinrichtungen ist in erster Linie von der Wärme- und Wasserdampf-abgabe der Tiere abhängig. Die DIN 18910 enthält entsprechende Werte. Abweichend von üblichen Grundlagen für klimatechnische Berechnungen wird jedoch in dieser Norm die Gesamtwärmeabgabe und nicht die sensible, trockene Wärmeabgabe der Tiere angegeben. In der Gesamtwärmeabgabe ist sowohl die sensible wie auch die latente, an Wasserdampf gebundene Wärmeabgabe enthalten, obgleich latente Wärme nicht direkt für Heizzwecke nutzbar ist. Außerdem berücksichtigt die Norm nicht eindeutig genug, daß sich die Anteile der sensiblen und latenten Wärmeabgabe von der Gesamtwärmeabgabe wie auch die Wasserdampf-abgabe der Tiere in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur ändern [2,7,8].

Eine weitere Besonderheit der DIN 18910 ist das Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Lüftungswärmebedarfs der Ställe im Winter sowie des erforderlichen Luftvolumenstromes aus der Kühllast des Stalles im Sommer. Diese Berechnungen werden nach DIN 18910 mit der Enthalpiedifferenz zwischen den Zu- und Fortluftströmen berechnet, wobei auch die in den Luftströmen enthaltene latente Wärme mit in die Berechnungen eingeht.

Dagegen werden im Normalfall wärme- und lüftungstechnische Berechnungen nach den Regeln der Klimatechnik auf die Abgabe oder den Bedarf sensibler Wärme (auch trockene, fühlbare oder nutzbare Wärme genannt) bezogen. Die Ströme latenter Wärme bleiben hierbei unberücksichtigt [5,10].

Die genannten Berechnungen sollen miteinander verglichen werden, um daraus Berechnungsverfahren für den Stallbau ableiten zu können, die möglichst denen für den Wohnungs- und Industriebau angepaßt sind. Ergänzend hierzu sind die für die Bemessung von Stalllüftungseinrichtungen erforderlichen Berechnungen für den Sommerbetrieb der Ställe zu überprüfen.

Grundlagen - Wärme- und Wasserdampfabgabe der Tiere

Grundlage aller Stallklimaberechnungen sind Rechenwerte über die Wärme-, Wasserdampf- und Kohlendioxidabgabe der Tiere, wobei letztere von untergeordneter Bedeutung sind. Die Rechenwerte nach DIN 18910 wie auch anderer Normen wurden in früheren Jahren aus dem Energieumsatz der Tiere abgeleitet [4,9,12]. Sie berücksichtigen kaum das Leistungs-niveau der Tiere sowie die Abhängigkeit ihrer Wärme- und Wasserdampfabgabe von der Umgebungstemperatur. Strøm und Feenstra [7] entwickelten deshalb für Stallklimaberechnungen ein zusammenfassendes Modell für die Wärmeabgabe von Rindern, Schweinen und Geflügel nach Auswertung praxisnah durchgeführter Versuche. Sie bezogen ihre Werte nicht wie üblich auf das Gewicht und Alter der Tiere, sondern auf eine thermische Tiereinheit = Wärmeproduktionseinheit (= 1 WPE), die mit 1000 Wh Gesamtwärmeabgabe/h bei 20 °C definiert ist.

In Abb. 1 ist die Gesamtwärmeabgabe sowie die Abgabe sensibler und latenter Wärme je WPE in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur nach Strøm und Feenstra dargestellt. Die eingezeichnete Kurve für die Wasserdampf-abgabe der Tiere wurde aus den Werten für die latente Wärmeabgabe mit der temperaturabhängigen spez. Enthalpie des Wasserdampfes neu berechnet. Für nachfolgende Vergleichsberechnungen werden die in Tabelle 1 aufgezeichneten Werte verwendet. Umrechnungen auf Einzelwerte/Tier sind dabei nicht erforderlich.

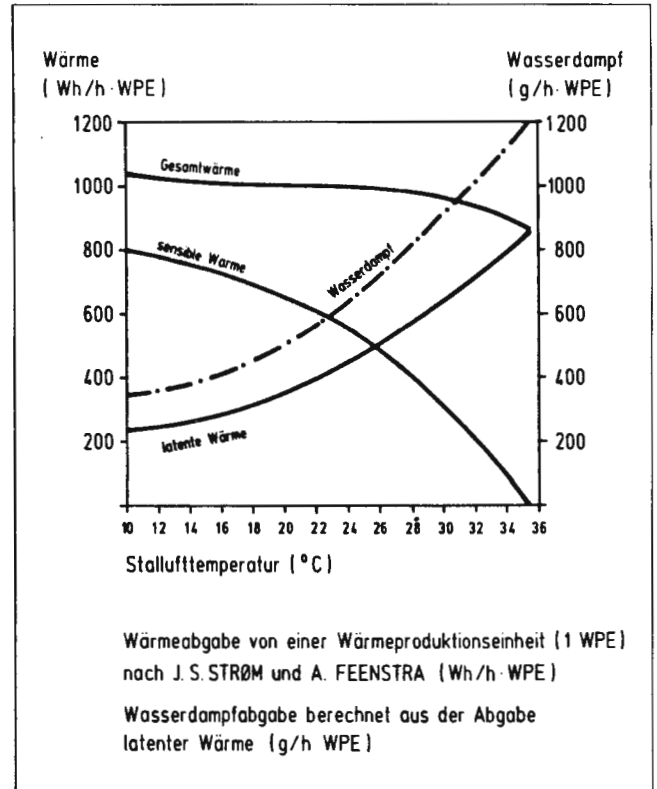


Abbildung 1: Wärme- und Wasserdampf-abgabe von Nutztieren in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur

Die Darstellungen von Strøm und Feenstra wurden gewählt, weil sie unabhängig von der Gattung, dem Alter und Gewicht der Tiere die Abhängigkeit der Wärme- und Wasserdampf-abgabe der Tiere von der Umgebungstemperatur zeigen.

Tabelle 1: Wärme- und Wasserdampf-abgabe der Tiere je Wärmeproduktionseinheit und Stunde

Wärme- und Wasserdampf-abgabe der Tiere je Wärmeproduktionseinheit und Stunde							
Temperatur °C	Wärmeabgabe 1)						Wasserdampf-abgabe 2) x _{TS} g/h · WPE
	sensible Wärme		latente Wärme		Gesamtwärme		
	Q̇ _{TS,s} Wh/h · WPE	kJ/h · WPE	Q̇ _{TS,l} Wh/h · WPE	kJ/h · WPE	Q̇ _{TS,g} Wh/h · WPE	kJ/h · WPE	
10	800	2880	240	864	1040	3744	343
15	730	2628	275	990	1005	3618	392
20	650	2340	350	1260	1000	3600	497
25	520	1872	475	1710	995	3582	672
30	315	1134	645	2322	960	3456	909
35	35	126	830	2988	865	3114	1165

1) nach Strøm und Feenstra
 2) berechnet aus latenter Wärmeabgabe $x_{TS} = \dot{Q}_{TS,l} / h_D$

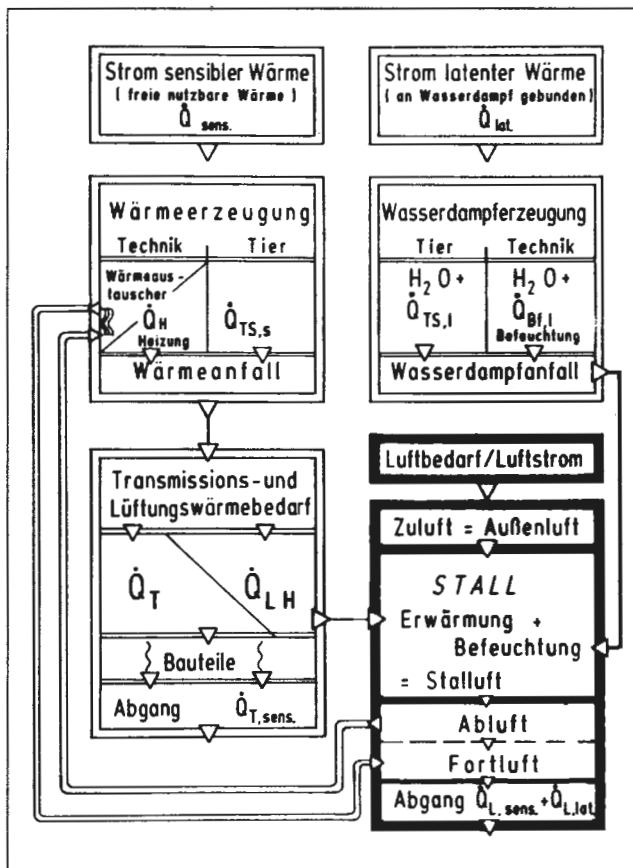
Grundlagen für Berechnungen mit feuchter Luft

Normale feuchte Luft ist ein Gemisch aus trockener Luft und Wasserdampf [1,5]. Bei Rechnungen mit feuchter Luft gilt die Masse von 1 kg trockener Luft, der eine veränderliche Masse von x kg Wasserdampf beigemischt ist, als Bezugsgröße. Die Masse der Mischung ist dann (1 + x) kg. Die absolute Feuchte der Luft beträgt hierbei x kg Wasserdampf je 1 kg trockener Luft.

Feuchte Luft enthält neben Wasserdampf auch Wärme, und zwar: sensible (trockene, fühlbare) Wärme und latente (an den Wasserdampf) gebundene Umwandlungswärme. Die spezifische Enthalpie, das ist der Wärmeinhalt des Luft-Wasserdampf-Gemisches, ist die Summe der Enthalpien der trockenen Luft und des Wasserdampfes:

$h_{(1+x)}$	= $h_L + x \cdot h_D$	
$h_{(1+x)}$	= spezifische Enthalpie feuchter Luft	[kJ/(1+x) kg]
h_L	= spezifische Enthalpie trockener Luft	[kJ/kg]
h_L	= $\vartheta \cdot c_{pL}$	
h_D	= spezifische Enthalpie von Wasserdampf	[kJ/kg]
h_D	= $r_0 + c_{pD} \cdot \vartheta$	
x	= Masse des der Luft beigemischten Wasserdampfes	[kg/kg]

Abbildung 2: Wege der Wärme-, Wasserdampf- und Luftströme eines Stalles ($\delta_1 \leq \delta_2$)



Die spezifische Enthalpie feuchter Luft ist:

$h_{(1+x)}$	= $\vartheta \cdot c_{pL} + x (r_0 + c_{pD} \cdot \vartheta)$	
ϑ	= Temperatur der Luft	[°C]
c_{pL}	= spezifische Wärmekapazität trockener Luft bei konstantem Druck, $c_{pL} = 1,006$	[kJ/kg K]
c_{pD}	= spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf bei konstantem Druck, $c_{pD} = 1,86$	[kJ/kg K]
r_0	= spezifische Verdampfungswärme von Wasser bei $\vartheta = 0^\circ\text{C}$, $r_0 = 2500$	[kJ/kg]

Die spezifische Wärmekapazität c_p eines Stoffes ist die Wärmemenge in kJ, die bei konstantem Druck erforderlich ist, um 1 kg Masse eines Stoffes um 1 K zu erwärmen.

Die spezifische Wärmekapazität feuchter Luft ist demnach:

$$c_{pL,f} = c_{pL} + c_{pD} \cdot x \quad [\text{kJ}/(1+x) \text{ kg} \cdot \text{K}]$$

Die spezifische Verdampfungswärme r_0 ist die Wärmemenge in kJ, die bei konstantem Druck erforderlich ist, um 1 kg Wasser zu verdampfen, d.h. aus dem flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand umzuwandeln (Bezugstemperatur $\pm 0^\circ\text{C}$).

Setzt man für c_{pL} , c_{pD} und r_0 die entsprechenden Werte ein, dann kann man die Enthalpie feuchter Luft berechnen:

$$h_{(1+x)} = \vartheta \cdot 1,006 + x (2500 + 1,86 \cdot \vartheta) \quad [\text{kJ}/(1+x) \text{ kg}]$$

Im vorliegenden Beitrag werden zwecks Vereinfachung und besserer Vergleichbarkeit der Berechnungsgänge folgende Berechnungsgrößen verwendet:

für lüftungstechnische Berechnungen:
der Luftmassenstrom \dot{m}_L in kg/h (anstelle des Luftvolumenstromes \dot{V}_L in m^3/h)

für wärmetechnische Berechnungen:
die Energie in kJ (anstelle von Wh)

(Einheiten, Umrechnungen und Formelzeichen siehe Übersicht im Anhang)

Luftbedarf eines Stalles

Bevor die Wärmedämmung und/oder Heizung eines Stalles bemessen werden kann, ist die Stalllüftung zu berechnen, denn vom Luftmassenstrom ist wiederum der Lüftungswärmebedarf abhängig.

Ställe bedürfen bekanntlich einer ausreichenden Lüftung, um den von den Tieren abgegebenen Wasserdampf sowie die im Stall entstehenden Schadgase und anderen Luftverunreinigungen abführen zu können. Der Luftbedarf bzw. Luft-

massenstrom \dot{m}_L wird entsprechend des Wasserdampf- und Gasanfalles im Stall nach dem Wasserdampf und/oder Kohlendioxidmaßstab berechnet, wobei der Wasserdampfmaßstab der wichtigere ist.

Wasserdampfmaßstab:

$$\dot{m}_{Lx} = \frac{\sum x_{TS}}{x_2 - x_1} \quad [\text{kg/h}]$$

Kohlendioxidmaßstab:

$$\dot{m}_{Lk} = \frac{\sum K_{TS}}{k_{L2} - k_{L1}} \quad [\text{kg/h}]$$

x_{TS} = Wasserdampfabgabe von Tieren und sonstigen untergeordneten Stellen im Stall [kg/h]

x_1 = absolute Feuchte der Außenluft [kg/kg]

x_2 = absolute Feuchte der Raumluft [kg/kg]

K_{TS} = Kohlendioxidabgabe der Tiere [g/h oder l/h]

k_{L1} = Kohlendioxidgehalt der Außenluft [g/kg oder l/kg]

k_{L2} = Kohlendioxidgehalt der Raumluft [g/kg oder l/kg]

Für die Bemessung der Lüftungsanlagen nach dem größten, für die Sommerlüftung erforderlichen Luftmassenstrom sind weitere Berechnungen nach dem "Wärmemaßstab" erforderlich (siehe Abschnitt 'Stalllüftung im Sommer'). Die vorstehenden Standardberechnungen sind in allen technischen Regelwerken gleich und bedürfen daher keiner weiteren Erklärungen.

Nachdem der Luftmassenstrom bestimmt ist, können die damit verbundenen Wärme- und Wasserdampfströme berechnet werden. Die im folgenden beschriebenen Zustandsänderungen der einen Stall durchströmenden Luft sollen die Zusammenhänge der einzelnen Wärme-, Wasserdampf- und Luftströme eines Stalles zeigen (vgl. Abb. 2). Die Zustandsänderungen beziehen sich nur auf die Enthalpie, Temperatur und Feuchte der Luft. Andere Luftbeimischungen bleiben unberücksichtigt.

Zustandsänderungen der im Winter einen Stall durchströmenden Luft

Bei der Stalllüftung unterliegt die einen Stallraum durchströmende Luft verschiedenen Zustandsänderungen. Dies wird deutlich, wenn man die Reihenfolge der sich ändernden Luft-Wärme-Ströme verfolgt (Reihenfolge vom Zuluft- bis zum Fortluftstrom, siehe Abb. 2).

Zuluft:

Angetrieben durch Motor- oder Schwerkraft strömt feuchte, kalte Außenluft mit dem Massenstrom \dot{m}_L in den Stall.

Die Zuluft hat die Enthalpie $h_{1,(1+x)}$, die Temperatur ϑ_1 und absolute Feuchte x_1 :

$$h_{1,(1+x)} = \vartheta_1 \cdot c_{pL} + x_1(r_0 + c_{pD} \cdot \vartheta_1)$$

Mit dem Massenstrom der Luft \dot{m}_L wird auch der an den Zuluftstrom gebundene Wärmestrom \dot{Q}_{L1} in den Stall geführt:

$$\dot{Q}_{L1} = \dot{m}_L \cdot h_{1,(1+x)}$$

$$\dot{Q}_{L1} = \dot{m}_L \cdot [\vartheta_1 \cdot c_{pL} + x_1(r_0 + c_{pD} \cdot \vartheta_1)]$$

Es bedeuten:

$\dot{Q}_{TS,s}$ = sensible, fühlbare Wärmeabgabe von Tieren und sonstigen untergeordneten Wärmequellen im Stall

$\dot{Q}_{TS,l}$ = latente, an Wasserdampf gebundene Wärmeabgabe von Tieren und sonstigen untergeordneten Wärmequellen im Stall

$\dot{Q}_{TS,g}$ = Gesamtwärmeabgabe von Tieren und sonstigen untergeordneten Wärmequellen im Stall

\dot{Q}_H = Wärmeleistung einer heiztechnischen Anlage (sensible Wärme)

\dot{Q}_{L1} = an den Zuluftstrom gebundener Gesamtwärmestrom (sensible + latente Wärme)

\dot{Q}_{L2} = an den Ab- oder Fortluftstrom gebundener Wärmestrom (sensible + latente Wärme)

\dot{Q}_{LH} = Bedarf sensibler Wärme zur Erwärmung (Heizung) des Zuluftstromes (= Lüftungswärmebedarf)

\dot{Q}_T = Bedarf sensibler Wärme zur Deckung der Transmissionswärmeverluste durch die raumschließenden Bauteile (= Transmissionswärmebedarf)

Stallluft

Der Zuluftstrom muß bei oder nach seinem Eintritt in den Stall von Außenlufttemperatur ϑ_1 auf Raumlufttemperatur ϑ_2 erwärmt werden. Die dafür erforderliche, dem Luftstrom zuzuführende sensible (Heiz-)Wärme entspricht dem Lüftungswärmebedarf des Stalles \dot{Q}_{LH} . Der Lüftungswärmebedarf \dot{Q}_{LH} wird mit der spezifischen Wärmekapazität feuchter Luft berechnet, die sich aus der spezifischen Wärmekapazität der trockenen Luft c_{pL} und derjenigen des Wasserdampfes c_{pD} zusammensetzt.

$$\dot{Q}_{LH} = \dot{m}_L [(\vartheta_2 - \vartheta_1) (c_{pL} + c_{pD} \cdot x_1)]$$

Mit der Zuführung sensibler Wärme \dot{Q}_{LH} erhöht sich die Temperatur des Luftstromes von ϑ_1 auf ϑ_2 , ohne daß sich dabei die absolute Luftfeuchte verändert:

$$\dot{Q}_{L1} + \dot{Q}_{LH} = \dot{m}_L [\vartheta_1 \cdot c_{pL} + x_1(r_0 + c_{pD} \cdot \vartheta_1) + (\vartheta_2 - \vartheta_1) (c_{pL} + c_{pD} \cdot x_1)]$$

$$\dot{Q}_{L1} + \dot{Q}_{LH} = \dot{m}_L [\vartheta_2 \cdot c_{pL} + x_1(r_0 + c_{pD} \cdot \vartheta_2)]$$

Die eingeströmte Luft nimmt zugleich bei ihrer Erwärmung auch den im Stall von den Tieren abgegebenen Wasserdampf auf. Der den Luftstrom befeuchtende Wasserdampf hat die Masse $x_2 - x_1$ und die Temperatur ϑ_2 . Die Masse des Wasserdampfes ergibt sich aus der Differenz der absoluten Feuchte der Stallluft x_2 und derjenigen der Außenluft x_1 . Damit kann nun der an den Wasserdampfstrom gebundene Strom latenter Wärme $\dot{Q}_{TS,I}$ berechnet werden:

$$\dot{Q}_{TS,I} = \dot{m}_L [(x_2 - x_1) (r_0 + c_{pD} \cdot \vartheta_2)]$$

Mit der Zuführung von Wasserdampf bzw. des an ihn gebundenen latenten Wärmestromes $\dot{Q}_{TS,I}$ erhöht sich die absolute Feuchte des Luftstromes von x_1 auf x_2 , ohne daß sich dabei die Lufttemperatur verändert:

$$\dot{Q}_{L1} + \dot{Q}_{LH} + \dot{Q}_{TS,I} = \dot{m}_L [\vartheta_2 \cdot c_{pL} + x_1 (r_0 + c_{pD} \cdot \vartheta_2) + (x_2 - x_1)(r_0 + c_{pD} \cdot \vartheta_2)]$$

$$\dot{Q}_{L1} + \dot{Q}_{LH} + \dot{Q}_{TS,I} = \dot{m}_L [\vartheta_2 \cdot c_{pL} + x_2 (r_0 + c_{pD} \cdot \vartheta_2)]$$

Nach Aufnahme sensibler Wärme und latenter Wärme (Wasserdampf) hat der Luftstrom seinen Endzustand erreicht. Die Stallluft wird mit dem an sie gebundenen Wärmestrom \dot{Q}_{L2} aus dem Stall abgeführt.

$$\dot{Q}_{L2} = \dot{Q}_{L1} + \dot{Q}_{LH} + \dot{Q}_{TS,I}$$

$$\dot{Q}_{L2} = \dot{m}_L \cdot h_{2,(1+x)}$$

Fortluft / Abluft

Die Fort- bzw. Abluft hat die Enthalpie $h_{2,(1+x)}$, Temperatur ϑ_2 und absolute Feuchte x_2 .

$$h_{2,(1+x)} = \vartheta_2 \cdot c_{pL} + x_2 (r_0 + c_{pD} \cdot \vartheta_2)$$

Aus den vorstehenden Bestimmungsgleichungen können nun die für wärme- und lüftungstechnische Berechnungen erforderlichen Berechnungsgänge abgeleitet werden. Für die Planung von Stallgebäuden beschränken sich die Berechnungen fast ausschließlich nur auf den Lüftungswärmebedarf der Gebäude und dies wiederum in vereinfachter Form.

Anhand der genauen Berechnungsgänge zur Bestimmung der Zustandsänderungen der einen Stall durchströmenden Luft sollte zugleich gezeigt werden, daß sensible und latente Wärmeströme nicht gleich sind. Latente Wärmeströme können unmittelbar nur die absolute Luftfeuchte, nicht aber die Lufttemperatur verändern. Dagegen stehen Stoff- oder Lufttemperaturänderungen immer in direkter Verbindung mit sensiblen Wärmeströmen.

Lüftungswärmebedarf der Ställe

Als Lüftungswärmebedarf eines Gebäudes bezeichnet man den Strom sensibler Wärme, der erforderlich ist, um den kalten, feuchten Zuluftstrom von Außenluft- auf Raumlufttemperatur zu erwärmen. Dies ist bei genauer Bezeichnung:

$$\dot{Q}_{LH} = \dot{m}_L \cdot \Delta\vartheta (c_{pL} + c_{pD} \cdot x_1)$$

Da aber der Wasserdampfgehalt der Außenluft x_1 bei Temperaturen unter 0°C äußerst klein ist, kann er in der Praxis ver-

nachlässigt werden. Damit ergibt sich für den Lüftungswärmebedarf eines Stalles die vereinfachte Berechnung:

$$\dot{Q}_{LH} = \dot{m}_L \cdot \Delta\vartheta \cdot c_{pL}$$

$$\dot{Q}_{LH} = \dot{m}_L \cdot \Delta\vartheta \cdot 1,006 \quad [\text{kJ/kg}]$$

$$\dot{Q}_{LH} \approx \dot{m}_L \cdot \Delta\vartheta \cdot 1 \quad [\text{kJ/kg}]$$

Die letzte Bestimmungsgleichung für \dot{Q}_{LH} ist in der Klimatechnik gebräuchlich und ausreichend genau. Die Abrundung von c_{pL} bringt in der Regel nur einen Fehler von weniger als 1 %.

Die Norm DIN 18910 weicht vom vorstehenden Berechnungsverfahren ab. Nach ihr wird der Lüftungswärmebedarf eines Stalles $\dot{Q}_{L(DIN)}$ mit der Enthalpiedifferenz zwischen feuchter Fort- und Außenluft berechnet, wobei der Wasserdampfgehalt beider Luftströme unterschiedlich groß ist.

$$\dot{Q}_{L(DIN)} = \dot{m}_L (h_{2,(1+x_2)} - h_{1,(1+x_1)})$$

$$\dot{Q}_{L(DIN)} = \dot{m}_L [\vartheta_2 \cdot c_{pL} + x_2 (r_0 + c_{pD} \cdot \vartheta_2) - \vartheta_1 \cdot c_{pL} - x_1 (r_0 + c_{pD} \cdot \vartheta_1)]$$

Nach Auflösung dieser Gleichung erhält man:

$$\dot{Q}_{L(DIN)} = \dot{m}_L [\Delta\vartheta (c_{pL} + c_{pD} \cdot x_1) + \Delta x (r_0 + c_{pD} \cdot \vartheta_2)]$$

Die Auflösung der Bestimmungsgleichung nach DIN 18910 zeigt, daß in ihr neben dem tatsächlichen Lüftungswärmebedarf auch die von den Tieren abgegebene latente Wärme enthalten ist.

$$\dot{Q}_{L(DIN)} = \dot{m}_L (h_{2,(1+x_2)} - h_{1,(1+x_1)})$$

$$\dot{Q}_{L(DIN)} = \underbrace{\dot{m}_L \cdot \Delta\vartheta (c_{pL} + c_{pD} \cdot x_1)}_{\dot{Q}_{LH}} + \underbrace{\dot{m}_L \cdot \Delta x (r_0 + c_{pD} \cdot \vartheta_2)}_{\dot{Q}_{TS,I}}$$

$\dot{Q}_{L(DIN)}$ kennzeichnet also weder einen "Lüftungswärmebedarf" im gebräuchlichen Sinne noch einen entsprechenden "Wärmeverlust durch Lüftung". $\dot{Q}_{L(DIN)}$ ist die Zusammenfassung von ($\dot{Q}_{LH} + \dot{Q}_{TS,I}$) zu einem Wert. Diese Zusammenfassung ist zwar rein rechnerisch richtig, im physikalischen Sinne jedoch falsch oder zumindest irreführend, weil der falsche Eindruck erweckt wird, daß man sensible Wärmeströme (\dot{Q}_{LH}) und latente Wärmeströme ($\dot{Q}_{TS,I}$) gleichwertig zur Deckung des Lüftungswärmebedarfs nutzen kann. Daß dies nicht der Fall ist, ist aus dem Berechnungsverfahren nach DIN 18910 nicht erkennbar. Dieser gravierende Fehler der Norm beruht auf dem, auf die Gesamtwärmeabgabe der Tiere abgestimmten Berechnungsverfahren, bei dem nicht nach sensiblen und latenten Wärmeströmen unterschieden wird. Auf die Planung des Wärmeschutzes der Stallgebäude hat das jedoch keinen negativen Einfluß.

Wärmestrombilanzen

Klimatechnische Berechnungen für Hochbauten werden in der Regel nur mit dem Anfall oder Bedarf sensibler Wärmeströme durchgeführt. Damit ergeben sich folgende Wärmestrombilanzen für einen Stall:

Wärmestrombilanz nach Regeln der Klimatechnik:

a) Stall ohne Zusatzheizung

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{TS,s} - \dot{Q}_{LH} - \dot{Q}_T &= 0 \\ \dot{Q}_{TS,s} &= \dot{Q}_{LH} + \dot{Q}_T \\ \dot{Q}_{TS,s} &= [\dot{m}_L \cdot \Delta\vartheta \quad (c_{pL} + c_{pD} \cdot x_1)] + \sum k \cdot A \cdot \Delta\vartheta\end{aligned}$$

b) Stall mit Zusatzheizung

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{TS,s} + \dot{Q}_H - \dot{Q}_{LH} - \dot{Q}_T &= 0 \\ \dot{Q}_{TS,s} + \dot{Q}_H &= \dot{Q}_{LH} + \dot{Q}_T \\ \dot{Q}_H &= \dot{Q}_{LH} + \dot{Q}_T - \dot{Q}_{TS,s}\end{aligned}$$

Im Gegensatz dazu enthalten die entsprechenden Wärmestrombilanzen nach DIN 18910 sensible und latente Wärmeströme.

Wärmestrombilanz nach DIN 18910:

a) Stall ohne Zusatzheizung

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{TS,g} + \dot{Q}_{L1} - \dot{Q}_{L2} - \dot{Q}_T &= 0 \\ \dot{Q}_{TS,g} &= (\dot{Q}_{L2} - \dot{Q}_{L1}) + \dot{Q}_T \\ \dot{Q}_{TS,g} &= [\dot{m}_L (h_2 - h_1)] + \sum k \cdot A \cdot \Delta\vartheta\end{aligned}$$

b) Stall mit Zusatzheizung

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{TS,g} + \dot{Q}_H + \dot{Q}_{L1} - \dot{Q}_{L2} - \dot{Q}_T &= 0 \\ \dot{Q}_{TS,g} + \dot{Q}_H &= (\dot{Q}_{L2} - \dot{Q}_{L1}) + \dot{Q}_T \\ \dot{Q}_H &= (\dot{Q}_{L2} - \dot{Q}_{L1}) + \dot{Q}_T - \dot{Q}_{TS,g}\end{aligned}$$

Die Wärmestromdifferenz $(\dot{Q}_{L2} - \dot{Q}_{L1})$ wird in der DIN 18910 sowohl als Wärmeverlust durch Lüftung [9b] wie auch als Lüftungswärmebedarf [9c] bezeichnet.

Tabelle 2: Annahmen für Wärmestrombilanzen, Winter

Die vorstehenden Wärmestrombilanzen unterscheiden sich durch unterschiedliche Annahmen hinsichtlich der Wärmeabgabe der Tiere (Gesamt- oder sensible Wärmeabgabe, vgl. Abb. 1) und durch verschiedenartige Berechnungen des Lüftungswärmebedarfs der Ställe. Die übrigen Parameter für \dot{Q}_H und \dot{Q}_T sind in allen Fällen gleich.

Wärmeschutz der Bauteile, Transmissionswärmestrom

Bei einem Stall, dessen Wärmestrombilanz ohne Zusatzheizung ausgeglichen werden kann, wird der höchstzulässige Transmissionswärmestrom, der dann dem Transmissionswärmebedarf \dot{Q}_T entspricht, vergleichsweise berechnet:

1. nach Regeln der Klimatechnik:

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_{TS,s} - \dot{Q}_{LH}$$

Da $\dot{Q}_{TS,s} = (\dot{Q}_{TS,g} - \dot{Q}_{TS,l})$ ist, kann auch geschrieben werden:

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_{TS,g} - \dot{Q}_{TS,l} - \dot{Q}_{LH}$$

2. nach DIN 18910:

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_{TS,g} - \dot{Q}_{L(DIN)}$$

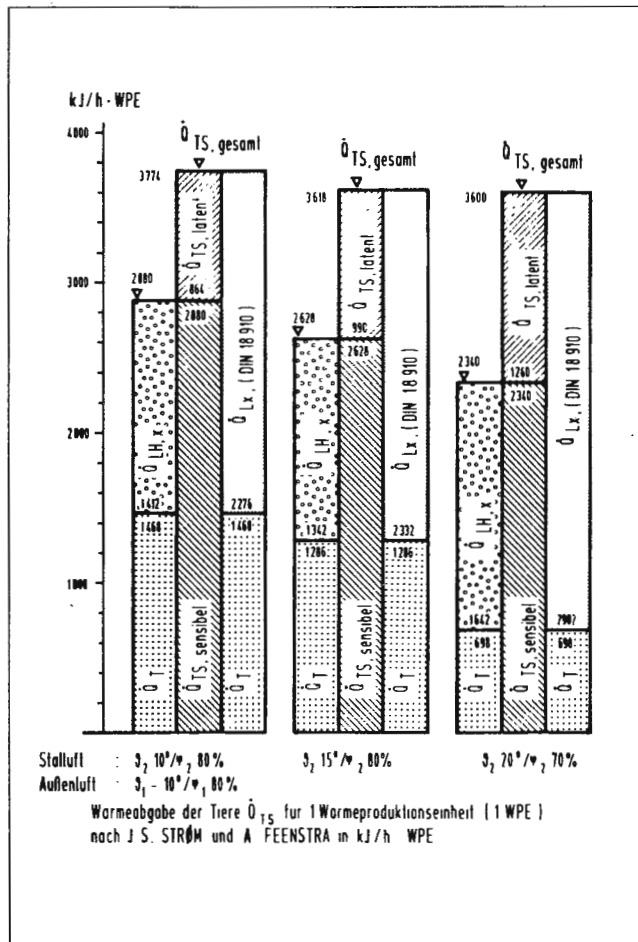
$\dot{Q}_{L(DIN)}$ entspricht $(\dot{Q}_{TS,l} + \dot{Q}_{LH})$, damit wird:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_T &= \dot{Q}_{TS,g} - (\dot{Q}_{TS,l} + \dot{Q}_{LH}) \\ \dot{Q}_T &= \dot{Q}_{TS,g} - \dot{Q}_{TS,l} - \dot{Q}_{LH}\end{aligned}$$

Annahmen für Wärmestrombilanzen, Winter							
Stallluft				Wärme- u. Wasserdampf-abgabe der Tiere nach Tab. 1			Luftmas- senstrom
ϑ_2	φ_2	x_2	h_2	$\dot{Q}_{TS,s}$ sensibel	$\dot{Q}_{TS,g}$ gesamt	x_{TS}	\dot{m}_{Lx}
°C	%	g/kg	kJ/kg	kJ/h·WPE	kJ/h·WPE	g/h·WPE	kg/h·WPE
10	80	6,18	25,60	2880	3744	343	70,14
15	80	8,63	36,88	2628	3618	392	53,35
20	70	10,42	46,52	2340	3600	497	54,39

Außenluft: $\vartheta_1 = -10$ °C	$x_1 = 1,29$ g/kg
$\varphi_1 = 80$ %	$h_1 = -6,82$ kJ/(1 + x)kg

Abbildung 3: Vergleich von Wärmestrombilanzen, bezogen auf die sensible oder Gesamtwärmeabgabe der Tiere



Weil die Bestimmungsgleichungen am Ende gleich sind, müssen auch die Endergebnisse für \dot{Q}_T trotz unterschiedlicher Berechnungsannahmen und -verfahren gleich sein.

Anhand konkreter Zahlenbeispiele sollen die besprochenen Berechnungsverfahren einander gegenübergestellt werden. Die Berechnungen beziehen sich auf eine Wärmeproduktionseinheit (1 WPE) nach Tabelle 1.

Es werden nacheinander berechnet:

1. Luftmassenstrom nach dem Wasserdampfmaßstab zur Abführung des im Stall anfallenden Wasserdampfes (siehe Tabelle 2)

$$\dot{m}_{L,x} = \frac{x_{Tb}}{x_2 - x_1} \quad \text{in kg/h} \cdot \text{WPE}$$

2. Lüftungswärmebedarf

2.1 nach Regeln der Klimatechnik (mit der ungekürzten Bestimmungsgleichung)

$$\dot{Q}_{LH,x} = \dot{m}_{L,x} \cdot \Delta\vartheta (c_{pL} + c_{pD} \cdot x_1) \quad \text{in kJ/h} \cdot \text{WPE}$$

2.2 nach DIN 18910

$$\dot{Q}_{L,x(DIN)} = \dot{m}_{L,x} (h_2 - h_1) \quad \text{in kJ/h} \cdot \text{WPE}$$

3. Höchstzulässiger Transmissionswärmestrom = Transmissionswärmebedarf \dot{Q}_T

3.1 nach Regeln der Klimatechnik, mit der sensiblen Wärmeabgabe der Tiere

$$\begin{aligned} \dot{Q}_T &= \dot{Q}_{TS,s} - \dot{Q}_{LH} \\ \dot{Q}_T &= \dot{Q}_{TS,s} - \dot{m}_{L,x} \cdot \Delta\vartheta (c_{pL} + c_{pD} \cdot x_1) \quad \text{in kJ/h} \cdot \text{WPE} \end{aligned}$$

3.2 nach DIN 18910 mit der Gesamtwärmeabgabe der Tiere

$$\begin{aligned} \dot{Q}_T &= \dot{Q}_{TS,g} - \dot{Q}_{L(DIN)} \\ \dot{Q}_T &= \dot{Q}_{TS,g} - \dot{m}_{L,x} (h_2 - h_1) \quad \text{in kJ/h} \cdot \text{WPE} \end{aligned}$$

In Abb. 3 sind die Berechnungsergebnisse von \dot{Q}_{LH} , $\dot{Q}_{L(DIN)}$ und \dot{Q}_T mit der jeweiligen Wärmeabgabe der Tiere vergleichend dargestellt. Trotz unterschiedlicher Berechnungsverfahren ist \dot{Q}_T in jedem der drei gezeigten Fälle gleich. Abb. 3 verdeutlicht die Unterschiede der Berechnungsverfahren hinsichtlich der Ermittlung von \dot{Q}_{LH} und $\dot{Q}_{L(DIN)}$. Ferner wird der erhebliche Einfluß der Umgebungstemperatur auf die Wärmeabgabe der Tiere und den höchstzulässigen Transmissionswärmestrom \dot{Q}_T sichtbar. Je höher die Stalllufttemperatur im Winter sein soll, um so größer werden bei ausgeglichener Wärmestrombilanz die Aufwendungen für den Wärmeschutz der Gebäude, weil der zur Deckung des Transmissionswärmebedarfs verbleibende Wärmestrom der Tiere immer geringer wird und die Temperaturdifferenz zwischen Stall- und Außenluft zunimmt. Von beiden Größen (\dot{Q}_T und $\Delta\vartheta$) ist die erforderliche Wärmedämmung der raumumschließenden Bauteile im hohen Maße abhängig.

Aus dem höchstzulässigen Transmissionswärmestrom \dot{Q}_T und der Temperaturdifferenz zwischen Stall- und Außenluft kann die Wärmedämmung des Stalles ermittelt werden:

$$\dot{Q}_T = \sum k \cdot A \cdot \Delta\vartheta \quad \text{in W (Wh/h)}$$

$$\sum k \cdot A = \frac{\dot{Q}_T}{\Delta\vartheta} \quad \text{in W}$$

k = Wärmedurchgangskoeffizient eines Bauteiles $\text{W/m}^2 \text{K}$
 A = Fläche eines Bauteiles m^2

Die Wärmedämmung der raumumschließenden Bauteile ergibt sich aus Einzelberechnungen der zueinander gehörenden Flächen und Wärmedurchgangskoeffizienten nach DIN 4108 [11].

Stalllüftung im Sommer

Stalllüftungsanlagen müssen nach den größten Luftmassenströmen bemessen werden, die für die Sommerlüftung erforderlich sind. Die Lüftungsanlagen sollen gewährleisten, daß auch bei hohen Umgebungstemperaturen die Stalllufttemperatur nicht wesentlich über Außenlufttemperatur ansteigt und die Luftfeuchte im Stall möglichst unter der Schwülegrenze gehalten wird.

Die Kühllast eines Stalles \dot{Q}_K , das ist die den Wärmehaushalt im Sommer belastende Wärmemenge, setzt sich zusammen

Tabelle 3: Klimaannahmen für die Stalllüftung im Sommer

Klimaannahmen für die Stalllüftung im Sommer			
Stallluft		Außenluft	
ϑ_2 °C	φ_2 %	ϑ_1 °C	φ_1 %
35	40	34, 33, 32, 31, 30	40
30	50	29, 28, 27, 26, 25	50
25	70	24, 23, 22, 21, 20	70
20	80	19, 18, 17, 16, 15	80

aus der Wärmeabgabe der Tiere, der Wärmeabgabe von technischen Geräten und dem durch die raumumschließenden Bauteile von außen eindringenden Transmissionswärmestrom. Bei der Kühllastberechnung eines Stalles kann im allgemeinen die Wärmeabgabe technischer Geräte und der Transmissionswärmestrom vernachlässigt werden, so daß für \dot{Q}_K allein nur die von den Tieren abgegebene Wärme entscheidend ist.

Luftvolumen -/ -massenstrom im Sommer nach DIN 18910

Nach DIN 18910 wird der im Sommer erforderliche Luftvolumenstrom mit der empirischen Bestimmungsgleichung nach dem Wärmemaßstab berechnet:

$$V_{L,q} \text{ (DIN)} = \frac{\dot{Q}_{TS,g}}{\Delta\vartheta' \cdot f} \quad \text{in m}^3/\text{h}$$

$\dot{Q}_{TS,g}$ = Gesamtwärmeabgabe der Tiere in Wh/h

$\Delta\vartheta'$ = die Zielgröße für den Temperaturunterschied zwischen Stall- und Außenluft in K

f = ein Faktor, der mit 0,9 anzusetzen ist.

Der Faktor f = 0,9 entspricht etwa der mittleren Enthalpiedifferenz (in Wh/m³) zwischen dem Zu- und Fortluftstrom im Sommer.

Durch Umrechnung der vorstehenden Gleichung auf den Luftmassenstrom $\dot{m}_{L,q}$ unter Verwendung der Energieeinheit kJ, erhält man:

$$m_{L,q} \text{ (DIN)} = \frac{\dot{Q}_{TS,g}}{\Delta\vartheta' \cdot 2,8} \quad \text{in kg/h}$$

Bei der Umrechnung wurde die mittlere Dichte der Luft mit 1,14 kg/m³ für den Temperaturbereich zwischen 25 °C und 30° C angenommen. Der Faktor 2,8 entspricht nunmehr der mittleren Enthalpiedifferenz in kJ/kg zwischen dem Zu- und Fortluftstrom im gleichen Temperaturbereich.

In diese Berechnung geht $\Delta\vartheta'$ als sogenannte "Zielgröße für den Temperaturunterschied zwischen Stall- und Außenluft"

ein. Damit wird fälschlicherweise der Eindruck erweckt, als ob man generell bei Einhaltung des errechneten Luftvolumen- oder -massenstromes nach DIN 18910 eine bestimmte Temperaturdifferenz zwischen Stall- und Außenluft erreichen könne. Dies ist nicht der Fall, weil sich auch diese Berechnung auf die Gesamtwärmeabgabe der Tiere bezieht, welche sensible und latente Wärmeströme enthält. Latente Wärmeströme haben aber keinen Einfluß auf die Lufttemperatur.

Sollen bestimmte Grenzwerte der Stalllufttemperatur eingehalten werden, ist eine Berechnung des Luftmassenstromes in Anlehnung an die Kühllast-Regeln der Klimatechnik erforderlich, wobei ausschließlich die sensiblen Wärmeströme maßgeblich sind.

Luftmassenstrom im Sommer nach Regeln der Klimatechnik

Zur Abführung der im Stall anfallenden Wärme mittels Lüftung ist der erforderliche Luftmassenstrom aus der "trockenen" Kühllast des Raumes \dot{Q}_K und der zulässigen Erhöhung der Raumlufttemperatur über Außenlufttemperatur $\Delta\vartheta_{zul}$ zu berechnen:

$$\dot{m}_{L,q} = \frac{\dot{Q}_K}{\Delta\vartheta_{zul} \cdot c_{pL}}$$

Für \dot{Q}_K kann die sensible Wärmeabgabe der Tiere $\dot{Q}_{TS,s}$ eingesetzt werden:

$$\dot{m}_{L,q} = \frac{\dot{Q}_{TS,s}}{\Delta\vartheta_{zul} \cdot c_{pL}}$$

$$\dot{m}_{L,q} \approx \frac{\dot{Q}_{TS,s}}{\Delta\vartheta_{zul} \cdot 1} \quad \text{in kg/h}$$

Betrachtet man den Verlauf der sensiblen Wärmeabgabe der Tiere nach Abb. 1, so wird erkennbar, daß bei hohen Umgebungstemperaturen wesentlich geringere Luftmassenströme zur Wärmeabführung erforderlich sind als bei niedrigeren Temperaturen, weil die sensible Wärmeabgabe der Tiere mit steigender Umgebungstemperatur abnimmt. Eine ausschließlich auf sensible Wärmeströme bezogene Stalllüftung könnte somit in Klimazonen mit lang anhaltenden, hohen Sommer-temperaturen (>30°C) problematisch werden, weil sie im Extremfall bei Temperaturen über 35°C gegen Null ausläuft. Dies hätte einen unzulässigen Anstieg der Luftfeuchte im Stall zur Folge, der den Tieren die Abgabe latenter Wärme über die Atmungsorgane oder die Haut erschwert. Für besonders ungünstige Fälle soll deshalb auch der Luftmassenstrom nach dem Wasserdampfmaßstab überprüft werden.

Luftmassenstrom im Sommer nach dem Wasserdampfmaßstab

Der Luftmassenstrom zur Abführung des im Stall anfallenden Wasserdampfes wird wie für die Winterlüftung berechnet:

$$\dot{m}_{L,x} = \frac{x_{TS}}{x_2 - x_1} \quad \text{in kg/h}$$

Tabelle 4: **Differenz der absoluten Luftfeuchte ($x_2 - x_1$) in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz ($\vartheta_2 - \vartheta_1$) zwischen Stall- und Außenluft im Sommer**

Differenz der absoluten Luftfeuchte ($x_2 - x_1$) in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz ($\vartheta_2 - \vartheta_1$) zwischen Stall- und Außenluft im Sommer					
ϑ_1 : 15 bis 34 °C ϑ_2 : 20 bis 35 °C	Temperaturdifferenz zwischen Stall- und Außenluft $\vartheta_2 - \vartheta_1$ [K]				
	1	2	3	4	5
$x_2 - x_1$ in g/kg	0,8	1,5	2,2	2,9	3,6

Hierbei kann von Klimaannahmen ausgegangen werden, die sich nach der Schwülegrenze für Menschen [3] und realistischen oberen Grenzwerten für die Enthalpie der Außenluft im Sommer orientieren (Tabelle 3).

Unter diesen Bedingungen kann vereinfachend mit Mittelwerten für die Differenz der absoluten Luftfeuchte ($x_2 - x_1$) in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Stall- und Außenluft gerechnet werden (Tabelle 4).

Luftmassenstrom im Sommer - Vergleichsberechnungen

Mit den Werten für die Wärme- und Wasserdampfabgabe der Tiere nach Tabelle 1, bezogen auf 1 Wärmeproduktions-einheit (WPE), ist vergleichsweise der Massenstrom für die Sommerlüftung berechnet.

a) nach dem Wärmemaßstab:

$$\dot{m}_{L,q} = \frac{\dot{Q}_{TS,s}}{\Delta\vartheta_{zul} \cdot C_{pL}} \quad \text{kg/h} \cdot \text{WPE} \quad (C_{pL} \approx 1)$$

b) nach dem Wasserdampfmaßstab:

$$\dot{m}_{L,x} = \frac{x_{TS}}{x_2 - x_1} \quad \text{kg/h} \cdot \text{WPE} \quad (x_2 - x_1 \text{ nach Tabelle 4})$$

Tabelle 5: **Luftmassenstrom \dot{m}_L nach verschiedenen Berechnungsmaßstäben, bezogen auf 1 Wärmeproduktions-einheit (WPE)/ \dot{m}_L in kg/h · WPE**

Luftmassenstrom \dot{m}_L nach verschiedenen Berechnungsmaßstäben, bezogen auf 1 Wärmeproduktions-einheit (WPE) \dot{m}_L in kg/h · WPE						
ϑ_2 °C	Maßstab	$\vartheta_2 - \vartheta_1$ [K]				
		1	2	3	4	5
35	$\dot{m}_{L,q}$	126	63	42	32	25
	$\dot{m}_{L,x}$	1456	777	530	402	324
	\dot{m}_L , (DIN)	1112	556	371	278	222
30	$\dot{m}_{L,q}$	1134	567	378	284	227
	$\dot{m}_{L,x}$	1136	606	413	313	253
	\dot{m}_L , (DIN)	1234	617	411	309	247
25	$\dot{m}_{L,q}$	1072	936	624	468	374
	$\dot{m}_{L,x}$	784	418	285	216	174
	\dot{m}_L , (DIN)	1279	640	426	320	256
20	$\dot{m}_{L,q}$	2340	1170	780	585	468
	$\dot{m}_{L,x}$	621	331	226	171	138
	\dot{m}_L , (DIN)	1285	643	429	321	257

c) nach DIN 18910 (Wärmemaßstab):

$$\dot{m}_L \text{ (DIN)} = \frac{\dot{Q}_{TS,s}}{\Delta\vartheta \cdot 2,8} \quad \text{kg/h} \cdot \text{WPE}$$

Die Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefaßt.

Die drei zu vergleichenden Berechnungsverfahren zeigen nur bei einer Stalllufttemperatur von 30 °C gut übereinstimmende Ergebnisse. Ansonsten unterscheiden sie sich folgendermaßen:

Der Luftmassenstrom $\dot{m}_{L,q}$ zur Abführung sensibler Wärme nimmt mit steigender Stalllufttemperatur ab, während $\dot{m}_{L,x}$ zur Abführung des Wasserdampfes zunimmt. Bei 30°C Stalllufttemperatur wird $\dot{m}_{L,x}$ größer als $\dot{m}_{L,q}$. Die Luftmassenströme nach DIN 18910 sind dagegen in allen Temperaturbereichen nahezu gleich, weil die Gesamtwärmeabgabe der Tiere, auf die sich die Berechnungen beziehen, relativ konstant ist.

Die weit verbreitete Meinung, daß mit steigender Umgebungstemperatur auch die Stalllüftung proportional zu steigern ist, ist nur bedingt richtig. Die größten Luftmassenströme zur Abführung des Wasserdampfes ($\dot{m}_{L,x}$) werden bei Stalllufttemperaturen über 30 °C benötigt. Dennoch sind sie kleiner als diejenigen zur Abführung der Wärme ($\dot{m}_{L,q}$) bei Stalllufttemperaturen unter 25 °C. Nach dem insgesamt größten erforderlichen Luftmassenstrom sind die Stalllüftungsanlagen zu bemessen. Dabei können die für 20 °C Stalllufttemperatur errechneten Luftmassenströme außer Betracht bleiben. Sie sind unrealistisch, denn es ist weder möglich noch notwendig die Stalllufttemperatur im Sommer auf 20 °C zu begrenzen.

Unter Berücksichtigung des physiologischen Toleranzbereiches der Nutztiere gegenüber hohen Umgebungstemperaturen, der Andauerzeiten der Tagesmitteltemperaturen der Außenluft im Sommer, sowie der erforderlichen Luftmassenströme zur Abführung von Wärme und Wasserdampf der Tiere, wird zur Bemessung von Stalllüftungsanlagen vorgeschlagen: Verwendung des für 25 °C geltenden Luftmassenstromes $\dot{m}_{L,q}$, berechnet mit der sensiblen Wärmeabgabe der Tiere (siehe Tabelle 5, $\dot{m}_{L,q}$ bei 25 °C).

Mit dem für 25 °C Stalllufttemperatur geltenden Luftmassenstrom $\dot{m}_{L,q}$ wird der gesamte Luftbedarf eines Stalles im Sommer mit ausreichender Sicherheit gedeckt, ohne daß die Stalllufttemperatur wesentlich über Außenlufttemperatur ansteigt oder die Luftfeuchte zu einer Belastung für die Tiere wird. Die vorgeschlagene Bezugstemperatur von 25 °C liegt nur unwesentlich über dem optimalen Umgebungstemperaturbereich ausgewachsener Tiere. Bei Stalllufttemperaturen über 25 °C, die sich zwangsläufig bei entsprechend hohen Außenlufttemperaturen einstellen, kann die Stalllüftung bis auf den zur Abführung des Wasserdampfes erforderlichen Luftmassenstrom $\dot{m}_{L,x}$ reduziert werden.

Tabelle 5 zeigt, daß der Problembereich für die Stalllüftung im Sommer nicht, wie allgemein angenommen wird, bei hohen Stalllufttemperaturen liegt. Er ist vielmehr im Stalllufttemperaturbereich zwischen 20 °C und 25 °C zu suchen, wo die größten Luftmassenströme zur Wärmeabführung benötigt werden. Tabelle 5 macht aber auch die Abhängigkeit des Luftmassenstromes von der Temperaturdifferenz zwischen Stall- und Außenluft (Übertemperatur der Stallluft gegenüber der Außenluft) deutlich. Forderungen, nach denen die Stalllufttemperatur weniger als 2 K über Außenlufttemperatur ansteigen

darf [9b,9c] dürften weit überzogen sein, weil zu ihrer Erfüllung Luftmassenströme erforderlich sind, die aus ökonomischen, (akustischen) und energetischen Gründen nicht vertreten werden können. Eine Reduzierung der zulässigen Temperaturdifferenz zwischen Stall- und Außenluft von 2 K auf 1 K bedeutet eine Verdoppelung des Luftmassenstromes. Praxisgerecht sind dagegen zulässige Stalllufttemperaturen von 2 K bis 4 K über Außenlufttemperatur [12].

Das empirische Verfahren nach DIN 18910 zur Berechnung des erforderlichen Luftmassenstromes im Sommer ist ungenau. Es bezieht sich auf die nahezu konstante Gesamtwärmeabgabe der Tiere und berücksichtigt nicht die temperaturabhängige Abgabe sensibler Wärme, welche allein die Stalllufttemperatur beeinflusst. Die Berechnungen liefern zwar bei Außenlufttemperaturen zwischen 25 °C und 29 °C ausreichend genaue Ergebnisse. Tagesmitteltemperaturen der Außenluft über 25 °C sind jedoch im langjährigen Mittel in Deutschland nur etwa bis zu 2 Tage/Jahr zu erwarten [6]. Für die Stalllüftung ist der Außenlufttemperaturbereich zwischen 20 °C und 25 °C sehr viel wichtiger. In den meisten Regionen Deutschlands ist im langjährigen Mittel etwa bis zu 18 Tagen/Jahr, in besonders warmen Gegenden bis zu 30 Tagen/Jahr mit Tagesmitteltemperaturen der Außenluft zwischen 20 °C und 25 °C zu rechnen [6]. Für diesen Temperaturbereich errechnet man aber nach DIN 18910 einen viel geringeren Luftmassenstrom als zur Wärmeabführung tatsächlich erforderlich ist. Folglich wird sich eine größere Differenz zwischen Stall- und Außenlufttemperatur einstellen als rechnerisch mit der "Zielgröße" angenommen wurde. D.h.: die Ställe werden wärmer als erwartet. Außerdem ist der Luftmassenstrom nach DIN 18910 nicht groß genug, um bei Stalllufttemperaturen über 30 °C den anfallenden Wasserdampf ausreichend abführen zu können, was mit einem unerwünschten Anstieg der Luftfeuchte verbunden ist

Zusammenfassung und Schlußbetrachtung

Lüftungs- und wärmetechnische Berechnungen für Hochbauten werden überwiegend nach Normen oder sonstigen technischen Regelwerken durchgeführt, in denen die erforderlichen Berechnungsgrundlagen und -verfahren festgelegt sind. Zwischen den Regelwerken für Stallgebäude oder für Wohn-, Verkehrs- und Industriegebäude gibt es jedoch trotz gleichartiger Aufgabenstellung große Unterschiede. Während in der Regel bei Lüftungs- und wärmetechnischen Planungsaufgaben für Hochbauten allein vom Anfall oder Bedarf sensibler Wärmeströme ausgegangen wird, werden für Stallbauten derartige Berechnungen auf die Gesamtwärmeabgabe der Tiere bezogen, welche sowohl sensible wie auch latente Wärmeströme enthalten. Dementsprechend verschieden sind auch die Berechnungsverfahren. Es sollte daher der Frage nachgegangen werden, ob die besonderen Berechnungsgrundlagen und -verfahren der für den Stallbau gültigen Norm DIN 18910 richtig und gerechtfertigt sind und in wie weit eine Harmonisierung der im Hochbau gebräuchlichen Regelwerke zwecks Vereinfachung und gegenseitiger Nutzung bei wärme- und Lüftungstechnischen Planungsaufgaben möglich ist.

Bei den Berechnungen nach DIN 18910 wird nicht nach sensiblen und latenten Wärmeströmen unterschieden. Damit wird der Anschein erweckt, daß sensible und latente Wärmeströme gleichwertig zur Deckung des Transmissions- und Lüftungswärmebedarfs eines Gebäudes genutzt werden könnten, was physikalisch falsch ist. Das Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Lüftungs-Wärmeströme mit der Enthalpiedifferenz zwischen dem Zu- und Fortluftstrom schafft hier jedoch einen Ausgleich, denn in der spezifischen Enthalpie

der Luft ist auch die latente Wärme enthalten. Wärmestrombilanzen zur Bemessung des Wärmeschutzes von Stallgebäuden im Winter führen somit zum gleichen Endergebnis wie nach dem allgemein gebräuchlichen Berechnungsverfahren der Klimatechnik.

Nicht jeder Anwender der DIN 18910 wird aus dem Berechnungsgang die Besonderheiten der Norm erkennen. Es besteht somit die Gefahr, daß Grundlagen oder Rechenverfahren der DIN 18910 in der Praxis falsch eingesetzt werden können, zumal in der Norm auch Begriffe anders ausgelegt werden als in der Klimatechnik gebräuchlich. Dies gilt besonders für den Lüftungswärmebedarf.

Als Lüftungswärmebedarf bezeichnet man in der Klimatechnik den Bedarf sensibler Wärme zur Erwärmung des Zuluftstromes von Außenluft- auf Raumlufttemperatur im Winter. Der sogenannte "Lüftungswärmebedarf" nach DIN 18910 ist dagegen ein Lüftungs-Wärmestrom, der sowohl den Lüftungswärmebedarf wie auch den Strom der latenten Wärmeabgabe der Tiere enthält. Auch dieser Fehler ist aus dem Berechnungsablauf nicht erkennbar.

Die empirische Bestimmungsgleichung zur Berechnung des erforderlichen Luftmassenstromes im Sommer nach DIN 18910 ist ungenau. Sie bezieht sich auf die nahezu konstante Gesamtwärmeabgabe der Tiere und berücksichtigt nicht die temperaturabhängige Abgabe sensibler Wärme, welche allein die Stalllufttemperatur beeinflusst. Die Berechnungen liefern nur bei Außenlufttemperaturen zwischen 25 °C und 29 °C bei einer Stalllufttemperatur von 30 °C ausreichend genaue Ergebnisse. Bei niedrigeren Lufttemperaturen werden zu geringe Luftmassenströme ermittelt, so daß die von den Tieren abgegebene Wärme nicht ausreichend abgeführt werden kann. Auch bei Lufttemperaturen über 30 °C reicht der errechnete Luftmassenstrom nicht aus, um den im Stall anfallenden Wasserdampf ausreichend abführen zu können.

Anstatt mit der empirischen Bestimmungsgleichung nach DIN 18910 unter Verwendung der Gesamtwärmeabgabe der Tiere, sollte der Luftmassenstrom für die Sommerlüftung von Ställen mit der Gleichung:

$$\dot{m}_{L,q} = \frac{\dot{Q}_{T,s}}{\Delta\theta_{zul} \cdot c_{pL}} \quad \text{in kg/h}$$

mit dem Anfall sensibler Wärme, bezogen auf eine Stalllufttemperatur von 25 °C berechnet werden. Mit dem so ermittelten Luftmassenstrom wird der Luftbedarf bei niedrigeren und höheren Temperaturen ausreichend gedeckt, ohne daß die Stalllufttemperatur wesentlich über Außenlufttemperatur ansteigt und die Luftfeuchte zu einer Belastung für die Tiere wird.

Die Verwendung der Gesamtwärmeabgabe der Tiere als Bezugsgröße bei Lüftungs- und wärmetechnischen Berechnungen für Stallgebäude führt unter Annahme winterlicher Klimabedingungen zu korrekten Ergebnissen. Für die Berechnung von Stalllüftungseinrichtungen unter Annahme sommerlicher Klimabedingungen ist die Gesamtwärmeabgabe der Tiere jedoch eine ungeeignete Bezugsgröße.

Wärme- und Lüftungstechnische Berechnungen für Stallgebäude können einfacher und präziser mit dem Anfall oder Bedarf sensibler Wärmeströme unter Verwendung der in der Klimatechnik allgemein gebräuchlichen Rechenverfahren durchgeführt werden. Deswegen sollten die Planungsgrundla-

gen für den Stallbau grundlegend darauf umgestellt werden. Dabei ist besonders wichtig, daß auch der Einfluß der Umgebungstemperatur auf die Wärme- und Wasserdampf-abgabe der Tiere ausreichend berücksichtigt wird. Grundlagen dafür sind aus dem internationalen Schrifttum bekannt [7,8].

Zur weiteren Vereinfachung der Berechnungen empfiehlt es sich, die in der DIN 18910 bisher auf den Luftvolumenstrom bezogenen Grundlagen auf den Luftmassenstrom umzustellen. Damit können auch die in der Klimatechnik gebräuchlichen Zustandsdaten für feuchte Luft (Zahlentafeln) für den Stallbau verwendet werden, was zu einer Vereinheitlichung der Normen und einer Verringerung möglicher Berechnungsfehler beiträgt. Eine Umrechnung auf Volumenströme wäre dann nur noch bei der unmittelbaren Bemessung der Lüftungseinrichtungen erforderlich. Die Energie- und Leistungseinheiten Wh oder W für Wärmeströme sollten, wie im Bauwesen üblich, beibehalten werden.

Die Vergleiche der für Stallbauten nach der Norm DIN 18910 geltenden Verfahren für wärme- und Lüftungstechnische Berechnungen mit denjenigen für Wohn-, Verkehrs- und Industriebauten zeigen, daß letztere eindeutiger und zum Teil präziser sind. Es gibt keine plausiblen Gründe dafür, weshalb für Stallgebäude andersartige Berechnungsgrundlagen und -verfahren verwendet werden müßten als für gleichartige Planungsaufgaben im übrigen Hochbau. Eine Anpassung der Norm DIN 18910 an ähnliche für den Hochbau geltende Normen [10] ist aus Gründen der Vereinfachung und Harmonisierung technischer Regelwerke im internationalen Standard ebenso erforderlich wie für die Benutzung von EDV-Rechenprogrammen.

Technische Regelwerke für die Planung des Wärmeschutzes, der Heizungs-, Lüftungs- und Wärmerückgewinnungsanlagen von Stallgebäuden sind nicht nur von technischer, sondern auch von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Sie haben u. a. Auswirkungen auf die Bau- und Produktionskosten der Landwirtschaft sowie den Gebäude-, Umwelt- und Tierschutz. Normen für den Stallbau sollten deshalb so genau als möglich, aber dennoch verständlich und einfach in ihrer Anwendung sein, um Planungsfehler weitgehend zu vermeiden.

On the problem of adapting the basisses for the calculation of air flow and heat flow in animal houses to the standards of climate engineering

Methods for the calculation of air flow and heat flow in animal houses according to the German Norm DIN 18910 "climate in closed stables" are compared with methods for the calculation of ventilation and thermal insulation of dwelling-houses and industry buildings. It is possible to calculate all these buildings by using the same methods, if air flow and heat flow in animal houses will be calculated using the sensible heat production and not using the total heat production of the animals. The influence of the environment temperature on the heat and moisture production of animals must be considered. The ventilation calculations should be done using mass flows.

The maximum ventilation capacity of animal houses in summer should be calculated using the sensible heat production of the animals in connection to an environmental temperature of 25 °C. Calculating the summer ventilation including the total heat production of animals and the enthalpy difference between inside/outside air is not precise. Standards for calculating the air flows and heat flows in animal houses should be adapted to the standards of climate engineering.

Literatur

1. B a e h r, H. D.: Mollier-i,x-Diagramme für feuchte Luft in den Einheiten des Internationalen Einheitensystems.- Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heideiberg 1961.
2. B o r c h e r t, K.-L.: Berechnung des Wärmebedarfs geschlossener Ställe, Vorschläge zur Änderung der DIN 18910 "Klima in geschlossenen Ställen". - ILB-Institutsbericht Nr. 54/1987, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig - Völkenrode.
3. F o r t a k, H.: Meteorologie, Verlag Reimer, Berlin 1982.
4. K l i n g, G.: Stallklima, Berechnungsgrundlagen und Berechnungsverfahren, Internationaler Stand.- Deutsche Bauakademie, Berlin 1966.
5. R e c k n a g e l, S p r e n g e r, H ö n m a n n: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 1988/89, 64. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, Berlin 1987.
6. R e i d a t, R.: Klimadaten für Bauwesen und Technik (Lufttemperaturen); Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 64, Bd. 9, Offenbach/Main 1960.
7. S t r ø m, J. S. und A. F e e n s t r a: Wärmeabgabe bei Rindern, Schweinen und Geflügel; KTBL-Arbeitspapier 69, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt 1980.
8. C I G R and S F B I U: Climatization of Animal Houses, CIGR-Report, CIGR and SFBIU, Aberdeen 1984.
9. DIN 18910: Klima in geschlossenen Ställen, Beuth-Verlag, Berlin/Köln,a) Ausgabe 5/1963, b) Ausgabe 10/1974,c) Ausgabe 10/1987 - Entwurf -.
10. DIN 4701: Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden; Beuth Verlag, Berlin/Köln 3/1983.
11. DIN 4108:Wärmeschutz im Hochbau;Beuth Verlag, Berlin/Köln 8/1981.
12. NN: Schweizerische Stallklima-Norm, Institut für Tierproduktion ETHZ, Zürich 1983.

Verfasser: B o r c h e r t, Karl-Ludwig, Dipl.-Ing., Architekt, Institut für landwirtschaftliche Bauforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig - Völkenrode (FAL), Institutsleiter: Prof. Dr. agr. Joachim P i o t r o w s k i.

Anhang: Einheiten, Umrechnungen, Abkürzungen und Formelzeichen

Einheiten und Umrechnungen			
1 J	= 1	Ws	1 Ws = 1 J
1 kJ	= 0,2778	Wh	1 Wh = 3600 J = 3,6 kJ
C _{pL}	= 1,006	kJ/kg K	= 0,279 Wh/ K
C _{pD}	= 1,86	kJ/kg K	= 0,517 Wh/kg K
r ₀	= 2500	kJ/kg	= 694,5 Wh/kg

Abkürzungen und Formelzeichen

Zeichen	Bedeutung	Einheit	Zeichen	Bedeutung	Einheit
c_{pL}	spezifische Wärmekapazität trockener Luft bei konstantem Druck, $c_{pL} = 1,006$	kJ/kg K	K_{TS}	Kohlendioxidabgabe von Tieren	g/h, l/h
c_{pD}	spezifische Wärmekapazität des Wasserdampfes bei konstantem Druck, $c_{pD} = 1,86$	kJ/kg K	K_{L1}	Kohlendioxidgehalt der Außenluft	g/kg, l/kg
r_0	spezifische Verdampfungswärme des Wassers bei 0°C , $r_0 = 2500$	kJ/kg	K_{L2}	Kohlendioxidgehalt der Stallluft	g/kg, l/kg
$h_{(1+x)}$	spezifische Enthalpie (Wärmeinhalt) feuchter Luft	$\text{kJ}/(1+x)\text{kg}$	$\dot{Q}_{TS,s}$	sensible, fühlbare Wärmeabgabe von Tieren und sonstigen untergeordneten Wärmequellen im Stall	kJ/h
h_L	spezifische Enthalpie trockener Luft	kJ/kg	$\dot{Q}_{TS,l}$	latente, an Wasserdampf gebundene Wärmeabgabe von Tieren und sonstigen untergeordneten Wärmequellen im Stall	kJ/h
h_D	spezifische Enthalpie des Wasserdampfes	kJ/kg	$\dot{Q}_{TS,g}$	Gesamtwärmeabgabe von Tieren und sonstigen untergeordneten Wärmequellen im Stall	kJ/h
h_1	spezifische Enthalpie feuchter Außenluft	$\text{kJ}/(1+x)\text{kg}$	\dot{Q}_H	Wärmeleistung einer heiztechnischen Anlage (sensible Wärme)	kJ/h
h_2	spezifische Enthalpie feuchter Raum-(Stall-)Luft	$\text{kJ}/(1+x)\text{kg}$	\dot{Q}_{L1}	An den Zuluftstrom gebundener Gesamt-Wärmestrom (sensible + latente Wärme)	kJ/kg
ϑ_1	Temperatur der Außenluft	$^\circ\text{C}$	\dot{Q}_{L2}	An den Ab- oder Fortluftstrom gebundener Gesamt-Wärmestrom (sensible + latente Wärme)	kJ/kg
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenluft = $\vartheta_2 - \vartheta_1$	K	\dot{Q}_{LH}	Bedarf sensibler Wärme zur Erwärmung (Heizung) des Zuluftstromes (= Lüftungswärmebedarf)	kJ/h
x	Wasserdampfgehalt feuchter Luft (absolute Luftfeuchte)	kg/kg	\dot{Q}_T	Bedarf sensibler Wärme zur Deckung der Transmissionswärmeverluste durch die raumumschließenden Bauteile (=Transmissionswärmebedarf)	kJ/h
x_1	Wasserdampfgehalt feuchter Außenluft	kg/kg	$\dot{Q}_{L(DIN)}$	Lüftungs-Wärmestrom nach DIN 18910 = $Q_{LH} + Q_{TS,l}$	kJ/h
x_2	Wasserdampfgehalt feuchter Raumluft	kg/kg	\dot{V}_L	Volumenstrom der Luft (Volumendurchfluß) = m^3/e	m^3/h
Δx	Differenz des Wasserdampfgehaltes zwischen Raum-(Stall-) und Außenluft = $x_2 - x_1$	kg/kg			
x_{TS}	Wasserdampfabgabe von Tieren und sonstigen untergeordneten Stellen im Stall	kg/h			

Zeichen	Bedeutung	Einheit	Zeichen	Bedeutung	Einheit
\dot{m}_L	Massenstrom der Luft (Massendurchfluß) = $V_L \cdot \rho$	kg/h	$\dot{m}_{L,q}$	Luftmassenstrom nach dem Wärmemaßstab	kg/h
$\dot{m}_{L,x}$	Luftmassenstrom nach dem Wasserdampf- maßstab	kg/h	ρ	Dichte der Luft	kg/m ³
$\dot{m}_{L,k}$	Luftmassenstrom nach dem Kohlendioxid- maßstab	kg/h	k	Wärmedurchgangsko- effizient eines Bauteiles	W/ m ² K
			A	Fläche eines Bauteiles	m ²