

Zur Bemessung der Wärmedämmung von Ställen

Von Gerhard Englert, Freising-Weihenstephan*)

DK 636.083.1:699.86.003.1

Es wird mit Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen nachgewiesen, daß die in der Stallklima-Norm DIN 18910 angegebenen Wärmestrombilanzierungen und Rechenwerte für den Wärme- und Wasserdampfanfall im Stall sowie für die Temperatur und Feuchte der Außenluft zur Bemessung der Wärmedämmung von Ställen nicht geeignet sind. Die Bemessung könnte mit Häufigkeitsverteilungen für die Außentemperatur und zugeordneten Mittelwerten für die relative Feuchte der Außenluft erfolgen, wobei der Wärme- und Wasserdampfanfall mit einem Jahresmittelwert beschrieben werden müßte. Es zeigt sich jedoch am Beispiel eines Mastschweinstalles, daß die Veränderungen des Wärme- und Wasserdampfanfalls sowie der Stalltemperatur im Laufe eines Tages bzw. Jahres differenziert zu erfassen sind, insbesondere wenn die Belegung des Stalles energieintensiv ist.

1. Einleitung

Bei der Bemessung der Wärmedämmung von Ställen wird in der Praxis (s. z.B. [1]) in den meisten Fällen von der Stallklima-Norm DIN 18910 [2], d.h. von einer Wärmestrombilanz des Stalles, ausgegangen. Diese Bilanz bestimmen:

- der von den Tieren und von sonstigen Wärmequellen im Stall ausgehende und der mit der Zuluft verbundene Wärmestrom als zufließende Wärmeströme sowie
- der mit der Fortluft verbundene und der durch die Bauteile der Stallhülle hindurchgehende Wärmestrom als abfließende Wärmeströme.

Die erforderliche Wärmedämmung, d.h. der anzustrebende mittlere k -Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) der Stallhülle, errechnet sich dann aus der Bestimmungsgleichung für die ausgeglichene Wärmestrombilanz.

Die Berechnung der einzelnen Wärmeströme erfolgt dabei mit den in der DIN 18910 für die einzelnen Belegarten (Tierart, Tieralter, Nutzungsrichtung) tabellierten Rechenwerten der Temperatur und relativen Feuchte sowie für den Wärme- und Wasserdampf- bzw. Kohlendioxidanfall im Stall. Für die Temperatur der Außenluft im Winter sind für insgesamt 4 Klimagebiete Rechenwerte, für die relative Feuchte der Außenluft ist ein einheitlicher Rechenwert von 100 % angegeben.

Dieses in der Praxis eingeführte Bemessungsverfahren ist in der DIN 18910 nicht direkt vorgegeben. In der z.Z. gültigen Fassung wird nur beschrieben, wie und mit welchen Rechenwerten der Wasserdampf- bzw. Kohlendioxid- und der Wärmehaushalt des Stalles im Winter zu berechnen sind. Angegeben ist dann noch, daß der Wärmehaushalt bei den gegebenen außenklimatischen und den geforderten stallklimatischen Verhältnissen gedeckt sein muß, wobei eine mögliche Heizung sowie eine Rückgewinnung von Wärme durch Luftentfeuchtung gegebenenfalls zu berücksichtigen seien.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsprojektes.

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

Eine inzwischen vorliegende Überarbeitung der Norm [3] ist in ihren Aussagen hinsichtlich Bemessung der Wärmedämmung deutlicher, gibt jedoch das Bemessungsverfahren ebenfalls nicht direkt an. Schon im Titel der Norm erfolgt der Hinweis auf den Anspruch, Planungsgrundlagen für die Bemessung von u.a. der Wärmedämmung geben zu wollen. Es wird weiterhin festgehalten, daß die Norm Daten und Regeln zur Berechnung des Luftvolumenstromes im Winter und Sommer und der Wärmedämmung der Bauteile des Stalles geben soll. Der Anwendungsbereich wird dabei auf wärmedämmte Ställe beschränkt, bei denen die Wärmeabgabe der Tiere den Transmissions- und Lüftungswärmebedarf im Winter möglichst ganz oder weitgehend abdeckt. Daraus ließe sich als Bemessungsregel folgern, daß der Transmissionswärmebedarf soweit zu reduzieren sei, daß die Wärmestrombilanz ausgeglichen ist. Dies wird allerdings nicht ausgesprochen. Eine Bemessungsregel ist also auch in der Neufassung der Norm nicht definiert.

Wie an anderer Stelle [4] bereits dargestellt, ist es für die Dimensionierung der Wärmedämmung der Stallhülle unabdingbar, eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung durchzuführen, weil die Verbesserung der Wärmedämmung, z.B. durch Vergrößerung der Dämmschichtdicke(n) in einem (mehreren) Bauteil(en) der Stallhülle, mit Investitionen verbunden ist. Es können daher sicherlich nur die Dämmschichtdicken als sinnvoll angesehen werden, für die in einem bestimmten Zeitraum Aufwendungen entstehen, welche nicht größer sind als die Heizkosten-Einsparungen durch die zusätzliche Wärmedämmung im gleichen Zeitraum. Es lassen sich so wirtschaftliche von unwirtschaftlichen Wärmedämm-Maßnahmen abgrenzen. Die wirtschaftlichste Dämmschichtdicke ist dann diejenige, bei der die Wärmeenergiebilanz des Stalles mit minimalen Gesamtkosten ausgeglichen wird. Diese Wärmeenergiebilanz, genauer das bei der Bilanzierung errechnete Gesamt-Wärmeenergiedefizit, ergibt sich durch Multiplikation der jeweiligen zeitweisen Defizite in der Wärmestrombilanz mit den Zeiten, in denen diese Defizite auftreten.

Das in [4] vorgestellte EDV-Programm WABILOP ermöglicht diese Wirtschaftlichkeitsprüfung auf der Basis von mittleren jährlichen Gesamtkosten, die in einem vorgegebenen Betrachtungszeitraum zum Ausgleich des Gesamt-Wärmeenergiedefizits erforderlich sind. Dabei werden die Veränderungen der Außentemperatur in den verschiedenen Klimaregionen mit Häufigkeitsverteilungen erfaßt [5]. Diese sind das Ergebnis langjähriger Temperaturmessungen an verschiedenen Meßstationen des Deutschen Wetterdienstes. Für die relative Feuchte im Außenraum werden konstante Rechenwerte angenommen, so z.B. der Wert 100 % entsprechend DIN 18910.

Es wird zunächst untersucht, wie sich diese beiden Berechnungsverfahren sowie unterschiedliche Berechnungsannahmen für den Wärme- und Wasserdampfanfall im Stall bei einem Modellstall, der wahlweise mit Milchkühen, Mastschweinen oder Mastkälbern belegt ist, auf die Werte der Wärmedämmung der Stallhülle auswirken. Die inzwischen vom Deutschen Wetterdienst für 12 Klimaregionen und für die 8.760 Stunden eines sogenannten Testreferenzjahres (TRY, Test reference year) zur Verfügung gestellten Werte für 14 Klimafaktoren, **Tafel 1**, so u.a. für die Temperatur und relative Feuchte der Außenluft [6], erlauben es dann, in verschiedenen Klimaregionen zu überprüfen, ob die mit den bisherigen Berechnungsannahmen für das Außenklima erhaltenen Ergebnisse ausreichend genau sind. Falls dies nicht der Fall ist, sollen aus den neueren Rechenwerten des Deutschen Wetterdienstes Datensätze gefunden werden, welche den Außenklima-Einfluß möglichst einfach und doch genau genug beschreiben.

Abkürzung	Klimaregion	Repräsentative Meßstation
TRY 1	Nord- und Ostseeküste, nördliches Schleswig-Holstein	Bremerhaven
TRY 2	Nord- und westdeutsches Tiefland	Hannover
TRY 3	Ruhrgebiet und weitere Ballungsgebiete des Flachlandes	Essen
TRY 4	Nördliche und westliche Mittelgebirge ohne Hochlagen	Trier
TRY 5	Franken und nördliches Baden-Württemberg	Würzburg
TRY 6	Nördlicher Oberrheingraben	Frankfurt
TRY 7	Südlicher Oberrheingraben	Freiburg
TRY 8	Donaubecken und Alpenvorland bis ca. 600 m Höhe	Augsburg
TRY 9	Alpenvorland (ca. 600–1000 m Höhe), nördlicher Schwarzwald	München
TRY 10	Schwarzwald, Schwäbische und Fränkische Alb	Stötten
TRY 11	Hochlagen der nördlichen und westlichen Mittelgebirge	Hof
TRY 12	Bodensee mit Umgebung	Friedrichshafen

Tafel 1. Klimaregionen, für die Testreferenzjahr (TRY)-Daten vorliegen.

Abschließend wird für den Mast Schweinestall untersucht, ob sich die in der Praxis gegebenen Veränderungen des Wärme- und Wasserdampfstroms im Lauf eines Tages (als Folge unterschiedlicher Tieraktivität) bzw. Jahres (wegen Veränderung der Tiermasse bzw. Tierleistung), zusätzlich auch Veränderungen der Stalltemperatur während des Produktionszeitraumes, wie bisher angenommen, mit Jahresmittelwerten erfassen lassen.

2. Berechnungsgrundlagen

2.1 Steuerung des Lüftungs-Volumenstromes

Um die für die Bemessung der Wärmedämmung benötigte Wärmestrombilanz berechnen zu können, muß zunächst festgelegt sein, wie der Volumenstrom der Lüftung gesteuert werden soll. Praxisüblich ist es, nach DIN 18910 einen Mindest-Volumenstrom zu ermitteln, der dann die Lüftung im Winter bestimmt. Dazu wird mit den Rechenwerten für den Wasserdampf- bzw. Kohlendioxidanfall im Stall und für das Außenklima derjenige Volumenstrom bestimmt, bei dem die Wasserdampf- bzw. Kohlendioxidbilanz ausgeglichen ist. Der größere der beiden errechneten Volumenströme ist dann der Mindest-Volumenstrom. In der Übergangszeit, in vielen Ställen auch im Winter, wird der Lüftungs-Volumenstrom von einem Thermostaten gesteuert, also so bemessen, daß die Wärmestrombilanz des Stalles ausgeglichen bleibt.

Der konstante Mindest-Volumenstrom der Lüftung hat, wie in [7] gezeigt wird, bei energieintensiven Ställen (Ställe mit hohem Heizenergiebedarf, in denen die im Stall anfallenden Wärmeströme nicht einmal ausreichen, die Wärmeverluste über die Lüftung ausgeglichen, wie z.B. bei der Belegung mit Mastkälbern oder Sauen und Ferkeln) zur Folge, daß die Temperatur im Stall über lange Zeiträume hinweg den unteren Grenzwert des produktionspezifischen Optimalbereiches unterschreitet und sich die tierische Leistung verringert. Der mit einem Thermostaten gesteuerte Lüftungs-Volumenstrom bewirkt bei diesen Ställen, daß die relative Feuchte der Stallluft während eines langen Zeitraums den in der DIN 18910 festgelegten oberen Grenzwert überschreitet. Dies führt nicht nur zu einer Beeinträchtigung der tierischen Produktion und einer Verschlechterung der Arbeitsbedingungen im Stall, sondern auch zu einer Gefährdung der Bausubstanz. Bei den weitgehend energieautarken Ställen, bei denen die im Stall anfallende Wärme auch bei tieferen Temperaturen ausreicht, die Wärmeverluste über Lüftung und Stallhülle auszugleichen (z.B. bei der Belegung mit Milchkühen oder Mastbullen) bleiben die Temperatur und relative Feuchte im Optimalbereich.

Produktionsgerechte Werte der Temperatur und relativen Feuchte lassen sich also bei energieintensiver Belegung nur erreichen, wenn der Volumenstrom der Lüftung mit einem Feuchtesensor, also so gesteuert wird, daß die relative Feuchte im Stall konstant, d.h. aber daß die Wasserdampfbilanz ausgeglichen bleibt. Bei dieser, den Berechnungen dieser Arbeit zugrunde gelegten Feuchtesteuerung der Lüftung entstehende Defizite in der Wärmestrombilanz können durch Maßnahmen der Wärmedämmung bzw. Wärmerückgewinnung verringert oder müssen mit einer Zusatzheizung ausgeglichen werden, damit sich die Stalltemperatur nicht verändert. Die Steuerung des Heizungs-Wärmestromes erfolgt also mit einem Thermostaten.

2.2 Bilanzierung der Wärme-, Wasserdampf- und Kohlendioxidströme

Die für die Berechnungen zur Bemessung der Wärmedämmung benötigten Gleichungen für die Bilanz der Wärme- und Wasserdampf- bzw. Kohlendioxidströme sind in der DIN 18910 sowie in [7] zusammengestellt.

Der für eine ausgeglichene Wasserdampfbilanz beim Einsatz einer Heizung mit Rauchgasabführung erforderliche Volumenstrom der Lüftung $\dot{V}_{L,W}$ (in m^3/h) errechnet sich aus folgender Gleichung:

$$\dot{V}_{L,W} = \frac{\sum_j n_j \dot{m}_{W,j} (\vartheta_{i,R})}{x_i (\vartheta_{i,R}, \varphi_{i,R}) - x_a (\vartheta_a, \varphi_a) [\rho_i (\vartheta_{i,R}, \varphi_{i,R}) / \rho_a (\vartheta_a, \varphi_a)]} \quad (1)$$

mit

- n_j Zahl der Tiere von der Art bzw. Altersgruppe j auf ein Tier der Art bzw. Altersgruppe j bezogener, im Stall anfallender Wasserdampf-Massenstrom (g/h)
- $\dot{m}_{W,j}$ Wassergehalt (in g/m^3) der Außenluft (a) bzw. Stallluft (i)
- $x_{a(i)}$ Temperatur (in $^{\circ}C$) und relative Feuchte (in %) im Außenraum
- $\vartheta_{i,R}, \varphi_{i,R}$ Rechenwerte nach DIN 18910 für die Temperatur (in $^{\circ}C$) und relative Feuchte (in %) im Stall
- $\rho_{a(i)}$ Dichte (in kg/m^3) der Außenluft (a) bzw. Stallluft (i).

Für den zur ausgeglichenen Kohlendioxidbilanz bei Heizung mit Rauchgasabführung führenden Volumenstrom der Lüftung $\dot{V}_{L,K}$ (in m^3/h) gilt die folgende Bestimmungsgleichung:

$$\dot{V}_{L,K} = \frac{\sum_j n_j \dot{v}_{K,j}}{k_i - k_a [\rho_i (\vartheta_{i,R}, \varphi_{i,R}) / \rho_a (\vartheta_a, \varphi_a)]} \quad (2)$$

mit

- k_a Kohlendioxidgehalt der Außenluft (= $0,35 l/m^3$)
- k_i zulässiger Kohlendioxidgehalt der Stallluft (= $3,5 l/m^3$)
- $\dot{v}_{K,j}$ auf ein Tier der Art bzw. Altersgruppe j bezogener, im Stall anfallender Kohlendioxid-Volumenstrom (l/h).

Die Wärmestrombilanz des Stalles wird mit der folgenden Bestimmungsgleichung für die Wärmestromdifferenz $\Delta\dot{Q}$ (in W) beschrieben:

$$\Delta\dot{Q} = \dot{Q}_{Ti} + \dot{Q}'_{St} + \dot{Q}_H + \dot{Q}_{LZ} - \dot{Q}_{LF} - \dot{Q}_B \quad (3)$$

mit

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

Die beiden Wärmeströme \dot{Q}_{Ti} und \dot{Q}'_{St} werden in einem Wärmestrom, hier mit der Bezeichnung \dot{Q}_{St} , zusammen erfaßt. Der Wärmestrom der Heizung \dot{Q}_H wird von der Brennstoffart und dem eingesetzten Heizgerät bestimmt. Die übrigen Wärmeströme lassen sich nach folgenden Gleichungen bestimmen:

$$\dot{Q}_{St} = \sum_j n_j \dot{Q}_{St,j}(\vartheta_{i,R}) \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{LZ} = \dot{V}_L(\vartheta_a, \varphi_a) h_a(\vartheta_a, \varphi_a) [\rho_i(\vartheta_{i,R}, \varphi_{i,R}) / \rho_a(\vartheta_a, \varphi_a)] \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{LF} = \dot{V}_L(\vartheta_a, \varphi_a) h_i(\vartheta_{i,R}, \varphi_{i,R}) \quad (6)$$

$$\dot{Q}_B = k_m A_{ges}(\vartheta_{i,R} - \vartheta_a) \quad (7)$$

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 (k-Wert) der Bauteile der Stallhülle ($W/m^2 K$)
- $\dot{Q}_{St,j}$ auf ein Tier der Art bzw. Altersgruppe j bezogener, im Stall anfallender Wärmestrom (W)
- \dot{V}_L Volumenstrom der Lüftung (m^3/h).

Übersteigt der \dot{V}_L -Wert nach Gl. (1) oder (2) den Mindest-Volumenstrom der Lüftung im Sommer $\dot{V}_{L,S}$ nach Gl. (8)

$$\dot{V}_{L,S} = \frac{\dot{Q}_{St}}{0,8 \Delta\vartheta'} \quad (8)$$

mit (nach DIN 18910)

- $\Delta\vartheta' = 3 K$ für die Sommertemperaturzone ≥ 26 °C
- $\Delta\vartheta' = 4 K$ für die Zone < 26 °C,

so wird bei den Berechnungen dieser Arbeit \dot{V}_L durch $\dot{V}_{L,S}$ ersetzt. Diese Festlegung ist für energieintensive Ställe erforderlich, da es bei diesen sein kann, daß die Wärmebilanz selbst bei Außentemperaturen nahe der Stalltemperatur nicht ausgeglichen ist, der \dot{V}_L -Wert dann aber immer größer (wegen der immer kleiner werdenden Differenz im Nenner von Gl. (1) bzw. Gl. (2)) oder negativ wird.

2.3 Anforderungen an die Berechnungsannahmen

Für die Planung von Wärmedämm-Maßnahmen, d.h. zur Festlegung der Bauteile, deren Wärmedämmung verbessert werden soll und zur Dimensionierung der Wärmedämmschichten, muß für den jeweiligen Betrachtungszeitraum der Planung (meistens mehrere Jahrzehnte) errechnet werden können, wie sich die verbesserte Wärmedämmung auf die Wärmestrom- bzw. Wärmeenergiebilanz auswirkt. Die Wärmestrombilanz ist zeitabhängig, weil sich neben den k-Werten der Bauteile auch die übrigen Einflußgrößen, nämlich der Wärme- und Wasserdampf- bzw. Kohlendioxidanfall im Stall sowie die Temperatur und relative Feuchte der Außenluft, im Laufe des Tages und Jahres sowie von Jahr zu Jahr mehr oder weniger stark verändern.

Zur genauen Erfassung der Bilanzänderungen müßten für jede dieser Einflußgrößen Mittelwerte für möglichst kurze Zeiteinheiten im jeweiligen Zeitraum deutlicher Veränderungen zur Verfügung stehen. Diese Mittelwerte sind dabei als Erwartungswerte zu verstehen, die eine Aussage über das Verhalten der Einflußgrößen in der Zukunft ermöglichen sollen. Sofern sich Einflußgrößen im Laufe der Jahre verändern, lassen sich diese Veränderungen schwerlich mit entsprechenden Erwartungswerten darstellen. Bei Größen, die sich nur im Laufe eines Jahres oder eines Tages merklich verändern, können dagegen aus den Ergebnissen von kontinuierlichen Messungen über viele Jahre bzw. Tage hinweg Erwartungswerte, z.B. für die einzelnen Stunden eines Jahres bzw. Tages, errechnet werden.

Die Bilanzierung über die Stunden eines Jahres ist allerdings mit großem Rechenaufwand verbunden, so daß man versuchen muß, die Zahl der Rechenwerte durch geeignete weitere Mittelwertbildung zu verringern. Entscheidend ist in allen Fällen, daß bei der Ermittlung von Rechenwerten zur Bemessung der Wärmedämmung der gesamte Zeitraum, in dem sich die jeweilige Einflußgröße deutlich verändert, bei der Mittelwertbildung berücksichtigt wird. Der Grund dafür ist, daß die Wärmedämmung die Wärmestrombilanz ebenfalls im gesamten Betrachtungszeitraum beeinflusst.

Bei der Dimensionierung der Lüftung gilt eine grundlegend andere Anforderung an die Berechnungsannahmen. Bei der Planung von Lüftungsanlagen kommt es darauf an, den geringsten und größten benötigten Lüftungs-Volumenstrom zu berechnen. Wie aus den Gln. (1) bzw. (2) zu ersehen ist, wird der geringste, im Winter benötigte Lüftungs-Volumenstrom mit den Rechenwerten für den Wasserdampf- bzw. Kohlendioxidanfall im Stall ermittelt. In einem klimatisierten Stall verändern sich diese Bestimmungsgrößen hauptsächlich im Laufe eines Tages, und zwar durch den Stallbetrieb (z.B. Fütterung, Nachtruhe). Da der Lüftungs-Volumenstrom diesen Veränderungen folgt, ist der geringste Volumenstrom in Zeiten mit geringsten Wasserdampf- bzw. Kohlendioxidanfall erforderlich.

Die Rechenwerte für die Festlegung des geringsten Lüftungs-Volumenstromes müssen daher Durchschnittswerte sein, die sich auf den Zeitraum des Tages mit geringstem Wasserdampf- bzw. Kohlendioxidanfall beziehen. Der größte benötigte Lüftungs-Volumenstrom wird nach Gl. (8) durch den Wärmeanfall im Stall bestimmt. Auch diese Einflußgröße verändert sich vor allem im Laufe des Tages. Der benötigte Rechenwert muß deshalb ein Durchschnittswert für den Zeitraum des Tages mit größtem Wärmeanfall sein. Die Bemessung der Wärmedämmung und Lüftung mit den gleichen Rechenwerten ist daher nicht korrekt und kann zu falschen Ergebnissen führen.

2.4 Wärmeenergiedefizit

Mit den Rechenwerten für die Temperatur und relative Feuchte der Außenluft ist es dann möglich, die für die Wirtschaftlichkeitsprüfung benötigten Wärmeenergiedefizite zu berechnen. Dazu werden die einzelnen Wärmestromdifferenzen mit den Zeiten multipliziert, in denen die jeweiligen Temperaturen auftreten. Die Summe aller im Laufe eines Jahres auftretenden negativen Differenzen, also der Defizite der Wärmeenergiebilanz, ergibt das Gesamt-Wärmeenergiedefizit eines Jahres.

Dieses Berechnungsverfahren beschreiben bei den verschiedenen Angaben der Außenklima-Rechenwerte folgende Bestimmungsgleichungen für das Gesamt-Wärmeenergiedefizit ΔQ (in $Wh/Jahr$):

Bei ϑ_a, φ_a -Mittelwerten für bestimmte Zeiteinheiten Δt (in h):

$$\Delta Q = \Delta t \sum_{l=1}^{l=z} \Delta \dot{Q}_l(\vartheta_a, \varphi_a) \quad (9)$$

$$z = 8760/\Delta t \quad (10)$$

mit

z Zahl der Zeiteinheiten pro Jahr.

Bei ϑ_a -Häufigkeitsverteilung und φ_a -Mittelwerten bzw. φ_a -Rechenwerten:

$$\Delta Q = 0,5 \sum_n (\vartheta_{a,n}) [\Delta \dot{Q}(\vartheta_{a,n}, \varphi_{a,n}) + \Delta \dot{Q}(\vartheta_{a,n+1}, \varphi_{a,n+1})] \quad (11)$$

$$n = 0, 1, \dots, m$$

$$\vartheta_{a,n+1} = \vartheta_{a,n} + \Delta\vartheta$$

mit

$\Delta\vartheta$	Klassenbreite der Häufigkeitsverteilung
$t(\vartheta_{a,n})$	mittlere Zahl der Stunden pro Jahr mit einer Außentemperatur im Bereich $\vartheta_{a,n} \leq \vartheta_a < \vartheta_{a,n+1}$
$\vartheta_{a,n=0}$	untere Grenztemperatur (in °C) mit $t(\vartheta_{a,0}) = 0$
$\vartheta_{a,n=m}$	obere Grenztemperatur (in °C) mit
	$\Delta\dot{Q}(\vartheta_{a,m}, \varphi_{a,m}) + \Delta\dot{Q}(\vartheta_{a,m+1}, \varphi_{a,m+1}) \geq 0$
$\varphi_{a,n(n+1)}$	Mittelwert der relativen Feuchte der Außenluft (%) bei der Außentemperatur $\vartheta_{a,n}$ bzw. $\vartheta_{a,n+1}$; $\varphi_{a,n+1} = \varphi_{a,n} = \varphi_{a,R}$, falls der Mittelwert als einheitlicher Rechenwert $\varphi_{a,R}$ angegeben ist.

2.5 Bestimmung der wirtschaftlichsten Dämmschichtdicke

Die Bestimmung der wirtschaftlichsten Dämmschichtdicke erfolgt über die jährlichen Gesamtkosten zum Ausgleich des Gesamt-Wärmeenergie-defizits. Dazu wird die Dämmschichtdicke im jeweils betrachteten Bauteil der Stallhülle in Schritten von 1 cm verändert. Entsprechend dem in [4] näher erläuterten Verfahren werden dann die Jahreskosten für die Investitionen, für Instandhaltung und Reparaturen sowie für die bei den jeweiligen Dämmschicht-dicken verbleibenden Heizenergiekosten berechnet und zu den jährlichen Gesamtkosten aufsummiert. Die Dämmschichtdicke, der die geringsten jährlichen Gesamtkosten zugeordnet sind, kennzeichnet den wirtschaftlichsten Ausgleich des Gesamt-Wärmeenergie-defizits.

Zwischen dem Kapitalbetrag (Kapitalwert) K (in DM) und den entsprechenden Jahreskosten \dot{K} (in DM/Jahr) gelten dabei folgende Beziehungen:

$$K = \dot{K}/a_N \quad (12)$$

$$a_N = \frac{q^N (q - 1)}{q^N - 1} \quad \text{bei konstanten Jahreskosten} \quad (13)$$

$$a_N = \frac{\gamma (q/\gamma)^N [(q/\gamma) - 1]}{(q/\gamma)^N - 1} \quad \text{bei konstant steigenden Jahreskosten} \quad (14)$$

$$= q/N \quad \text{für } i = j$$

$$q = 1 + i$$

$$\gamma = 1 + j$$

mit

- i Zinssatz (%/Jahr)
- j Steigerungssatz (%/Jahr)
- N Betrachtungszeitraum (Jahre)
- q Zinsfaktor (1/Jahr)
- γ Steigerungsfaktor (1/Jahr).

3. Berechnungsannahmen

3.1 Belegung

Als Berechnungsbeispiele wurden die Belegung des Modellstalles mit Milchkühen, Mastschweinen (Rein-Raus-Verfahren) bzw. mit Mastkälbern (Haltung ohne Einstreu) ausgewählt. Die Belegung mit Milchkühen bzw. Mastschweinen ergibt nach den DIN-Werten für den Wärme- und Wasserdampf-anfall einen weitgehend energie-autarken, die Belegung mit Mastkälbern einen energieintensiven Stall.

In der momentan gültigen Fassung der DIN 18910 ist nicht angegeben, aus welchen Quellen die Rechenwerte für den Wärme-, Wasserdampf- bzw. Kohlendioxidanfall im Stall stammen und für welchen Zeitraum sie gelten. In der Neufassung (DIN 18910 neu) ist nun zumindest vermerkt, daß sich diese Rechenwerte auf eine durchschnittliche Tierleistung bei tierartüblicher Fütterung und Haltung und auf eine Tageszeit mit geringem Anfall (Nachtperiode)

de) beziehen. Damit jedoch sind die Rechenwerte der DIN 18910 für die Dimensionierung der Wärmedämmung nicht geeignet, da sie nur für die Nachtperiode, nicht aber für den ganzen Tag Gültigkeit haben. Als Rechenwerte für Zeiten mit geringem Anfall können die Werte für den Wasserdampf- bzw. Kohlendioxidanfall nur zur Dimensionierung der Lüftung im Winter, also zur Festlegung des Mindest-Volumenstromes, verwendet werden.

Aus beiden vorliegenden Fassungen der DIN 18910 ist nur indirekt zu entnehmen, daß die angegebenen Werte für den Wärmeanfall im Stall Rechenwerte für den Gesamt-Wärmeanfall sind bzw. dies sein müssen, weil die angegebenen Rechenwerte für die spezifische Enthalpie auch die latente (bei der Kondensation des Wasserdampfes freiwerdende) Wärme enthalten. Diese Bilanzierung unter Einbeziehung der sensiblen (freien) und latenten Wärme führt zwar zu einem korrekten Ergebnis für das Wärmestromdefizit, beinhaltet aber die Gefahr, daß mit den für die Lüftungs-Wärmeströme erhaltenen Werten weitergerechnet und dabei übersehen wird, daß sie auch die latente Wärme enthalten. Auf diese Gefahr weist *Borchert* [8] hin und empfiehlt daher, die Bilanzierung bei der Bemessung der Wärmedämmung allein mit den sensiblen Anteilen der Wärmeströme vorzunehmen.

Die im Stallklima-Bericht einer CIGR-Arbeitsgruppe [9] angegebenen Rechenwerte für den Wärme- und Wasserdampf- bzw. Kohlendioxidanfall sind Tagesmittelwerte aus Klimakammer-Fütterungsversuchen und daher für die Bemessung der Wärmedämmung grundsätzlich geeignet, wenngleich nachzuprüfen ist, ob sich der Einfluß dieser Bilanzierungsfaktoren mit Tagesmittelwerten ausreichend genau erfassen läßt. Ebenso wäre nachzuweisen, daß die Ergebnisse von Klimakammerversuchen die Verhältnisse in der Praxis genau genug wiedergeben und daß die Werte aus den relativ kurzzeitigen Klimakammerversuchen als Langzeit-Mittelwerte übernommen werden können. Ein Vorteil des CIGR-Berichtes ist, daß nach *Strøm* [10] Gleichungen angegeben sind, mit denen sich aus den Rechenwerten für den auf ein Tier bezogenen Gesamt-Wärmeanfall $\dot{Q}_{St,ges,j}$ (in W) die Anteile an sensibler $\dot{Q}_{St,sens,j}$ und latenter Wärme $\dot{Q}_{St,lat,j}$ sowie der Wasserdampf-anfall $\dot{m}_{W,j}$ und die Temperaturabhängigkeit dieser Größen ermitteln lassen:

$$\dot{Q}_{St,ges,j} = [1 + 4(20 - \vartheta_j)^3/10^5] \dot{Q}_{St,ges,o,j} \quad (15)$$

$$\dot{Q}_{St,sens,j} = [0,8 - 1,85(\vartheta_j + 10)^4/10^7] \dot{Q}_{St,ges,o,j} \quad (16)$$

$$\dot{Q}_{St,lat,j} = \dot{Q}_{St,ges,j} - \dot{Q}_{St,sens,j} \quad (17)$$

$$\dot{m}_{W,j} = \dot{Q}_{St,lat,j}/0,68 \quad (18)$$

mit

$$\dot{Q}_{St,ges,o,j} = 5,6 M^{0,75} + (1,6 P^3/10^5) + 22 Y \quad \text{für Milchkühe}$$

$$\dot{Q}_{St,ges,o,j} = 29 (M + 2)^{0,5} - 40 \quad \text{für Mastschweine}$$

$$\dot{Q}_{St,ges,o,j} = 71,5 (M + 150)^{0,5} - 880 \quad \text{für Mastkälber} \quad (19)$$

und mit

M	Masse je Tier (kg)
P	Trächtigkeitsdauer (Tage)
$\dot{Q}_{St,ges,o,j}$	unkorrigierte Gesamtwärme
Y	Milchleistung (kg/Tag).

Das Ergebnis von Praxismessungen über einen längeren Zeitraum sind die von *Schneider u. Müller* [11] in einem vorläufigen Bericht für Milchvieh- und Mastschweinställe angegebenen Tagesmittelwerte (nachfolgend als *Schneider*-Werte abgekürzt). Ein grundsätzliches Problem bei derartigen Messungen in der Praxis ist eine relativ hohe Ungenauigkeit bei der Messung der Lüftungsvolumenströme. *Schneider u. Müller* geben Fehler von 10–15 % an [12], *Niethammer* [13] hält Fehler in der Größenordnung von bis zu 50 % für möglich. Da der Volumenstrom der Lüftung die Wärmestrombilanz wesentlich beeinflusst, wirken sich diese Meßwertfehler entsprechend deutlich auf die über Wärmestrombilanzierungen ermittelten Werte für den Wärme- und Wasserdampf-anfall im Stall aus.

Die meisten der bei den Vergleichsberechnungen verwendeten Rechenwerte enthält Tafel 2. Angegeben sind die Werte nach DIN 18910 neu und CIGR. Sofern die CIGR-Rechenwerte für die Stalltemperatur von den DIN-Werten abweichen, erfolgen Vergleichsberechnungen mit Rechenwerten, die für die DIN-Temperaturwerte nach den Gln. (15)–(18) bestimmt wurden (CIGR-Datensatz), wobei die Rechenwerte für den Wärmefall nur den sensiblen Anteil angeben. Die Bilanzierung erfaßt in diesem Fall nur die sensiblen Anteile der Wärmeströme. Die *Schneider*-Rechenwerte lauten:

	Wärmefall (sensible/Gesamt-W.) (W/Tier)	Wasserdampfanfall (g/h Tier)
Milchkühe (600 kg/10 °C/80 %)	796/1 252	663
Mastschweine (60 kg/16 °C/80 %)	103/175	105

Bemerkenswert sind die deutlich größeren Werte für den Wasserdampfanfall im Stall, während die Werte für den Wärmefall sich nur relativ wenig von den Werten in Tafel 2 unterscheiden. Der höhere Wasserdampfanfall erfordert größere Volumenströme der Lüftung. Diese führen zu größeren Defiziten in der Wärmeenergiebilanz (der Stall wird damit energieintensiver) und zu höheren minimalen Jahreskosten.

Berechnungen mit Tagesmittelwerten für den Wärme- und Wasserdampfanfall im Stall, die dann für alle Tage des Jahres unverändert angenommen werden, basieren auf der vereinfachenden Annahme, daß diese Einflußgrößen im Laufe des Tages bzw. Jahres unverändert bleiben. Dies ist wegen der unterschiedlichen Tieraktivität im Laufe eines Tages und wegen der Änderungen der Tiermasse bzw. Tierleistung im Laufe des Jahres nicht der Fall, so daß die Berechtigung dieser Vereinfachung nachzuprüfen ist. Dies geschieht im Rahmen der vorliegenden Arbeit zunächst nur für die Belegung mit Mastschweinen. Bei den übrigen Tierarten erfolgen die Berechnungen mit konstanten Rechenwerten für diese beiden Größen.

Um die aktivitätsbedingten Veränderungen des Wärme- und Wasserdampfanfalls im Laufe eines Tages in die Untersuchungen einbeziehen zu können, wurden mit von *Abshoff* [14] für einen Mastschweinstall (Tiermasse: 90 kg) erhaltenen Meßwerten für die Stunden eines Tages mittlere Abweichungen vom Tagesmittelwert berechnet. Es wird dann davon ausgegangen, daß sich die gleiche Zeitabhängigkeit auch für die CIGR- bzw. *Schneider*-Werte anwenden läßt.

Zur Simulation der in Abhängigkeit von der Tiermasse auftretenden Veränderungen des Wärme- und Wasserdampfanfalls im Laufe eines Jahres wird angenommen, daß die Produktion mit Mast-

schweinen der Masse 25 kg beginnt, daß die Tiere pro Tag um 641 g zunehmen und nach 121 Tagen (Endmasse der Tiere: 102,6 kg) ausgestallt werden. Dies sind Durchschnittswerte für Bayern [15]. Mit der von den Praxisgegebenheiten etwas abweichenden Annahme, daß der Stall zwischen den einzelnen Produktionszyklen jeweils einen Tag nicht belegt ist, läßt sich eine dreimalige Belegung pro Jahr rechnerisch erfassen.

Die Veränderungen des Wärme- und Wasserdampfanfalls im Stall mit der Tiermasse werden für die CIGR-Werte mit den Gln. (15) bis (19) berechnet. Um in die Untersuchungen auch die mit den *Schneider*-Werten gegebene energieintensive Belegung einbeziehen zu können, wird davon ausgegangen, daß diese Werte in ihrer Massen- und Temperaturabhängigkeit ebenfalls den Gln. (15)–(19) folgen. Es ist dann allerdings eine Anpassung notwendig, indem in Gl. (19) der Wert 53 statt 40 subtrahiert und die sensible Wärme nach Gl. (16) mit dem Faktor 0,82 multipliziert wird. Sowohl bei den Berechnungen mit den CIGR- als auch mit den *Schneider*-Werten werden zusätzlich die aktivitätsbedingten Veränderungen im Laufe eines Tages mit der aus den *Abshoff*-Meßergebnissen ermittelten Zeitabhängigkeit simuliert.

Da der Mittelwert des leistungsorientierten Optimalbereiches der Stalltemperatur nach [3] mit der Masse von 20 °C (20 kg) auf 16 °C (100 kg) abnimmt, wird in einer weiteren Untersuchung berücksichtigt, daß sich die Stalltemperatur mit der Tiermasse folgendermaßen verändern soll:

Masse (kg)	Stalltemperatur (°C)
$20 \leq M \leq 30$	20
$30 < M \leq 50$	18
$50 < M$	16

Mit den Gln. (15)–(18) lassen sich dann die mit diesen Temperaturänderungen verknüpften Änderungen des Wärme- und Wasserdampfanfalls berechnen.

3.2 Temperatur und relative Feuchte der Außenluft

In der DIN 18910 sind als Rechenwerte für die Außentemperatur angegeben:

Klimagebiet I: - 10 °C	Klimagebiet II: - 12 °C
Klimagebiet III: - 14 °C	Klimagebiet IV: - 16 °C

Häufigkeitsverteilungen der Außentemperatur stehen für die Meßstationen Hamburg (Abkürzung: MH), München-Riem (MM) und Oberstdorf (MO) zur Verfügung (s. [5]). Die Verteilungen wurden aus Stundenmittelwerten von Meßergebnissen im Zeitraum 1951–1970 errechnet. Für diese Meßstationen gelten die DIN-Werte von - 12, - 14 bzw. - 16 °C.

Tafel 2. Rechenwerte für die Belegung des Modellstalles mit Milchkühen, Mastschweinen bzw. Mastkälbern.

Rechengröße	Einheit	Zahlenwert bei Belegung mit								
		Milchkühen ¹			Mastschweinen			Mastkälbern		
		DIN	CIGR	CIGRS	DIN	CIGR	CIGRS	DIN	CIGR	CIGRS
Stalltemperatur $\vartheta_{i,R}$	°C	10	10	10	16	13	16	18	10	18
Stallfeuchte $\varphi_{i,R}$	%	80	80	80	80	77	80	70	80	70
Tierzahl	1	48			330			160		
Masse	kg	600			60			100		
Wärmestrom $\dot{Q}_{St,j}$	W	986	1095	811	153	190	135	261	260	172
Wasserdampfstrom $\dot{m}_{W,j}$	g/h	356	370	418	68	71	79	159	88	116
Kohlendioxidstrom $\dot{V}_{K,St,j}$	l/h	161	*	*	25	*	*	43	*	*

DIN: Rechenwerte nach DIN 18910 neu [3]

CIGR: Rechenwerte nach CIGR [8] (Tabellenwerte, $\dot{Q}_{St,j}$: Gesamtwärme)

CIGRS: DIN-Rechenwerte für die Temperatur und relative Feuchte im Stall, $\dot{Q}_{St,j}$ – (sensible Wärme),

$\dot{m}_{W,j}$ – Rechenwerte nach CIGR-Gleichungen

¹ CIGR-Werte für Milchleistung: 15 kg/Tag, Trächtigkeitsdauer: 140 Tage

* Der Lüftungs-Volumenstrom zum Ausgleich der Kohlendioxidbilanz wird bei den Vergleichsberechnungen nicht berücksichtigt.

Die in Abschnitt 1 erwähnten Testreferenzjahr-Daten für die Temperatur und relative Feuchte der Außenluft in den 12 Klimaregionen sind Meßwerte für charakteristische Witterungsabschnitte eines beliebigen Jahres, welche die mittleren Verhältnisse in den jeweiligen Regionen beschreiben, oder sie wurden über Simulationsrechnungen ermittelt.

Für die relative Feuchte der Außenluft im Winter wird zunächst der in DIN 18910 angegebene Rechenwert von 100 % angenommen. Vergleichsberechnungen erfolgen mit den TRY-Rechenwerten.

3.3 Modellstall, finanzielle Rechenwerte

Die Berechnungen beziehen sich auf einen Modellstall der Abmessungen 30 x 12,5 x 3 m mit 25° Dachneigung. Die Flächen und k-Werte der einzelnen Bauteile der Stallhülle sind in der **Tafel 3** zusammengestellt. Bei den Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen wird von einem k-Wert der Dachdecke von 5,9 W/(m²K), d.h. von einer ungedämmten Dachdecke, ausgegangen. Die k-Werte verstehen sich als Jahresmittelwerte. Die Auswirkungen von Veränderungen des Transmissions-Wärmestromes durch die Bauteile im Laufe eines Tages bzw. Jahres als Folge der Temperaturträgheit der Baustoffe mitteln sich über längere Zeiten hinweg aus [16].

Bauteil	Fläche m ²	k-Wert W/(m ² K)
Außenwand	234,0	1,06
Dachdecke	414,0	0,85*
Fenster	30,0	2,70
Türen, Tore	27,5	0,83
Gesamt	705,5	1,00

* Dämmschichtdicke (Polystyrol-Extruderschäum) 3 cm

Tafel 3. Rechenwerte für den Modellstall mit den Abmessungen 30 x 12,5 x 3 m, Dachneigung 25°.

Für eine Verbesserung der Wärmedämmung wird nur die Dachdecke in Betracht gezogen. Den verwendeten Wärmedämmstoff Polystyrol-Extruderschäum kennzeichnen folgende Rechenwerte:

Wärmeleitfähigkeit	0,030 W/(mK)
Volumenbez. Preis	400 DM/m ³
Flächenbez. Preis	12 DM/m ²
Haltbarkeit	20 Jahre

Kosten für Wartung und Reparaturen werden vernachlässigt.

Den finanziellen Aufwand für eine Ölheizung mit Rauchgasabführung sowie die weiteren finanziellen Berechnungsannahmen enthält **Tafel 4**.

Rechengröße	Einheit	Zahlenwert
Heizgerät Stall		
– Preis	DM	4000
– Wartung, Reparaturen	DM/Jahr	200
– Haltbarkeit	Jahre	10
Preis der Wärmeenergie (Heizöl)	DM/kWh	0,108
Energiepreissteigerung	%/Jahr	5
Zinssatz	%/Jahr	5
Betrachtungszeitraum	Jahre	20

Tafel 4. Sonstige Rechenwerte.

3.4 Sonstige Luftzustandsgrößen

Für die Luftzustandsgrößen Dichte, Wassergehalt und spezifische Enthalpie standen Bestimmungsgleichungen nach [17] zur Verfügung, wobei die Abhängigkeit des Sättigungsdruckes von der Temperatur mit den ebenfalls in [17] angegebenen Näherungsgleichungen beschrieben wird.

4. Ergebnisse

4.1 Überprüfung des Bemessungsverfahrens

Ausgangspunkt der Untersuchungen ist die entsprechend der DIN 18910 (neu) vorgenommene Wärmestrombilanzierung und die Berechnung des zum Ausgleich der Bilanz erforderlichen mittleren k-Wertes bzw. der dazu benötigten Dämmschichtdicke im Dachdeckenbereich. Die Ergebnisse sind in **Tafel 5** zusammengestellt. Es zeigt sich, daß die Wärmestrombilanz bei Belegung mit Mastschweinen in den Klimagebieten II bis IV und beim Mastkälberstall in allen Klimagebieten nicht über eine Verbesserung der Wärmedämmung in der Dachdecke allein ausgeglichen werden kann. Das von DIN 18910 vorgezeichnete Bemessungsverfahren ist also nur begrenzt einsetzbar und führt zudem zu Dämmschichtdicken, die überdimensioniert und damit unwirtschaftlich sind, wie ein Vergleich mit den in **Tafel 6** enthaltenen Ergebnissen von Berechnungen mit dem EDV-Programm WABILOP für die Belegung mit Milchkühen aufzeigt. Die Werte der **Tafel 6** gelten für die Rechenwerte der DIN 18910 neu sowie für die Meßorte Hamburg (entspricht DIN-Klimagebiet II), München (Klimagebiet III) und Oberstdorf (Klimagebiet IV).

Der Rechenwert von 100 % für die relative Feuchte der Außenluft bleibt bei diesem Vergleich unverändert. In welchem Maße die differenzierte Einbeziehung der Außentemperatur mit Häufigkeitsverteilungen anstelle eines Rechenwertes zu den errechneten Unterschieden beiträgt, läßt sich nicht nachweisen. Es ist jedoch anzunehmen, daß die Unterschiede vor allem auf die grundsätzliche Verschiedenheit der Bemessungsverfahren zurückzuführen sind.

Klimagebiet n. DIN 18910	$\dot{V}_{L,W,R}$ m ³ /h	\dot{Q}_{St}	\dot{Q}_{LZ}	\dot{Q}_{LF}	\dot{Q}_B	$\Delta\dot{Q}$	k_D für $\Delta\dot{Q} = 0$	
							W/(m ² K)	s _D cm
Belegung mit Milchkühen								
I	3092	47 328	- 6 396	- 26 808	- 14 110	- 14	0,848	3,03
II	2 918	47 328	- 8 689	- 25 299	- 15 521	- 2 181	0,611	4,4
III	2 786	47 328	- 10 766	- 24 155	- 16 932	- 4 525	0,395	7,1
IV	2 686	47 328	- 12 677	- 23 288	- 18 343	- 6 980	0,202	14,4
Belegung mit Mastschweinen								
I	2 593 ¹	50 490	- 5 233	- 33 657	- 18 343	- 6 743	0,224	12,9
II	2 591 ¹	50 490	- 7 528	- 33 631	- 19 754	- 10 423	*	
III	2 589 ¹	50 490	- 9 761	- 33 605	- 21 165	- 14 041	*	
IV	2 587 ¹	50 490	- 11 912	- 33 579	- 22 576	- 17 577	*	
Belegung mit Mastkälbern								
I	2 884	41 760	- 5 772	- 38 963	- 19 754	- 22 729	**	
II	2 784	41 760	- 8 021	- 37 612	- 21 165	- 25 038	**	
III	2 704	41 760	- 10 110	- 36 531	- 22 576	- 27 457	**	
IV	2 642	41 760	- 12 064	- 35 693	- 23 987	- 29 984	**	

¹ Volumenstrom bei ausgeglichener Kohlendioxidbilanz ($\dot{K}_{St} = 22$ l/h)

* Die Wärmestrombilanz kann über die Wärmedämmung der Dachdecke allein nicht ausgeglichen werden.

** Die Wärmestrombilanz kann über Wärmedämmung allein nicht ausgeglichen werden.

Tafel 5. Wärmestrombilanz des Modellstalles bei Belegung mit Milchkühen, Mastschweinen bzw. Mastkälbern sowie k-Wert k_D und Dämmschichtdicke s_D im Dachdeckenbereich, die zum Bilanzausgleich erforderlich wären. Rechenwerte nach DIN 18910 neu.

Berechnungsannahme für ϑ_a		Rechenwerte	Schichtdicke s_D (cm/Jahreskosten \dot{K}_{ges} (DM/Jahr) bei Belegung mit					
ϑ_a	φ_a		Milchkühen		Mastschweinen		Mastkälbern	
			s_D	\dot{K}_{ges}	s_D	\dot{K}_{ges}	s_D	\dot{K}_{ges}
HV-MH*)	100 %	DIN	2	1457	3	1684	9	7788
HV-MH	100 %	CIGR	1	1395	2	1402	2	1453
HV-MH	100 %	CIGRS	2	1464	2	1464	6	2443
HV-MH	100 %	SCHN	5	3380	9	4260	-	-
HV-MM	100 %	DIN	2	1611	4	1897	10	8513
HV-MM	100 %	CIGR	2	1482	2	1477	2	1598
HV-MM	100 %	CIGRS	2	1629	3	1620	7	2792
HV-MM	100 %	SCHN	6	4136	9	4915	-	-
HV-MO	100 %	DIN	3	1782	4	2158	11	10095
HV-MO	100 %	CIGR	2	1631	3	1608	3	1757
HV-MO	100 %	CIGRS	3	1816	3	1771	8	3225
HV-MO	100 %	SCHN	7	5076	10	5901	-	-

*) HV: Häufigkeitsverteilung
MH/MM/MO: Meßstation Hamburg/München/Oberstdorf

Tafel 6. Wirtschaftlichste Dämmschichtdicken im Dachdeckenbereich s_D und geringste jährliche Gesamtkosten \dot{K}_{ges} zum Ausgleich der Wärmeenergiebilanz bei Belegung des Modellstalles mit Milchkühen, Mastschweinen bzw. Mastkälbern und bei unterschiedlichen Berechnungsannahmen für die Belegung; Rechenwerte für die Belegung nach Tafel 2 bzw. *Schneider* (SCHN).

4.2 Überprüfung der Berechnungsannahmen für den Wärme- und Wasserdampfanfall im Stall

Da die Berechnungsannahmen der DIN 18910 neu für den Wärme- und Wasserdampfanfall im Stall nicht den Anforderungen an Rechenwerte zur Bemessung der Wärmedämmung entsprechen, erfolgen zunächst Vergleichsberechnungen mit den im CIGR-Bericht (Tafel 2) und den von *Schneider* angegebenen Tagesmittelwerten. Die ebenfalls in Tafel 6 zusammengestellten Ergebnisse zeigen, daß die CIGR-Tabellenwerte zu geringeren minimalen Jahreskosten und meist auch kleineren Dämmschichtdicken führen, wohingegen sich mit den von *Schneider* ermittelten Werten, als Folge der größeren Werte für den Wasserdampfanfall, die minimalen Jahreskosten und wirtschaftlichsten Dämmschichtdicken deutlich erhöhen. Die Berechnungen mit den modifizierten CIGR-Werten (CIGRS-Datensätze) führen im Vergleich mit der CIGR-Rechnung zu höheren Jahreskosten und z.T. zu größeren Dämmschichtdicken. Der Grund dafür ist bei der Belegung mit Milchkühen, daß der CIGR-Tabellenwert für den Wasserdampfanfall kleiner ist als der nach den CIGR-Gleichungen errechenbare Wert. Beim Mastschweinestall sind die Berechnungsannahmen für die Stalltemperatur, beim Mastkälberstall zusätzlich für die relative Feuchte im Stall unterschiedlich (Tafel 2).

Bei der Einordnung dieser Ergebnisse ist zu beachten, daß sich die wirtschaftlichste Dämmschichtdicke als Maßstab zur Beurteilung des Einflusses unterschiedlicher Berechnungsannahmen nicht eignet. Wie die detaillierten Rechenergebnisse für das Beispiel des Mastkälberstalles am Meßort Oberstdorf in **Tafel 7** zeigen, errechnen sich mit den CIGRS-Werten für Dämmschichtdicken, die in der Nähe des Wertes der wirtschaftlichsten Lösung liegen, Jahreskosten, die sich nur relativ wenig von dem Minimalwert unterscheiden. So ergibt sich z.B. für eine Vergrößerung der Dämmschichtdicke um 50 % von 8 auf 12 cm eine Vergrößerung der minimalen Jahreskosten von nur 7 %. Dies ist bei der Beurteilung der wirtschaftlichsten Dämmschichtdicken grundsätzlich zu beachten. Es ergibt sich hier ein erwünschter planerischer Spielraum. Beurteilungsgröße bei den weiteren Untersuchungen werden allein die minimalen jährlichen Gesamtkosten sein. Die Berechnungen erfolgen dabei mit den CIGRS-Rechenwerten sowie mit den *Schneider*-Werten für den Milchvieh- und Mastschweinestall.

Dämmschichtdicke cm	Jahreskosten (DM/Jahr)			
	Wärmedämmung	Heizenergie	Heizgerät	Gesamt
0	0	32449	718	33167
2	664	5375	718	6757
4	930	2340	718	3988
6	1195	1419	718	3332
7	1328	1197	718	3243
8	1461	1046	718	3225
9	1594	934	718	3246
10	1726	856	718	3300
12	1992	743	718	3453
14	2258	670	718	3646
16	2523	618	718	3859
18	2789	581	718	4088
20	3055	551	718	4324

Tafel 7. Jährliche Gesamtkosten für Dämmung und Heizung in Abhängigkeit von der Dämmschichtdicke; CIGRS-Rechenwerte für die Belegung mit Mastkälbern nach Tafel 2; Außentemperatur: Häufigkeitsverteilung für den Meßort Oberstdorf; Außenfeuchte: 100 %.

4.3 Überprüfung der Berechnungsannahmen für das Außenklima

Mit den Datensätzen des Testreferenzjahres für die Temperatur und relative Feuchte der Außenluft läßt sich überprüfen, ob die konstanten Rechenwerte der DIN bzw. die Häufigkeitsverteilungen für die Außentemperatur sowie der konstante Rechenwert von 100 % für die relative Feuchte den Außenklima-Einfluß ausreichend genau wiedergeben.

Dazu wird zunächst aus den Häufigkeitsverteilungen für die Meßorte Hamburg und München bzw. aus den TRY-Temperatur-Stundenwerten der Klimaregionen 1 und 9 berechnet, an wieviel Stunden bzw. Tagen im Jahr die Außentemperatur den DIN-Rechenwerten entspricht oder diese unterschreitet. Die in **Tafel 8** zusammengestellten Ergebnisse zeigen, daß die DIN-Werte untere Grenzwerte für die Außentemperatur sind und damit den Einfluß der Außentemperatur auf die Wärmeenergiebilanz überbewerten. Sie führen deshalb sicherlich zu einer Überdimensionierung der wirtschaftlichsten Dämmschichtdicken. Dies läßt sich jedoch wegen der grundsätzlichen Unterschiedlichkeit der beiden Berechnungsverfahren (Wärmestrombilanz nach DIN, Wärmeenergiebilanz in WABILOP) nicht zahlenmäßig nachweisen.

Ort/ Klimaregion	$\vartheta_{a,R}$ °C	Zahl der Stunden/Tag im Jahr mit $\vartheta_a \leq \vartheta_{a,R}$	
		HV	TRY
Hamburg	-12	42,8/-	0/0
München	-14	79,8/-	44/1

Tafel 8. Zahl der Stunden bzw. Tage im Jahr, an denen der Richtwert der Außentemperatur nach DIN 18910 ($\vartheta_{a,R}$) unterschritten wird; HV: Häufigkeitsverteilung; TRY: Testreferenzjahr-Daten.

Um nachprüfen zu können, ob die bisher verwendeten Häufigkeitsverteilungen für einzelne Meßorte auch für die zugeordneten Klimaregionen repräsentativ sind, werden aus den TRY-Temperatur-Stundenwerten für die Klimaregionen 1 und 9 Häufigkeitsverteilungen mit der gleichen Klasseneinteilung wie bei den für die beiden Meßorte Hamburg und München vorliegenden Verteilungen berechnet. Der Wert von 100 % für die relative Feuchte der Außenluft bleibt unverändert. Die Ergebnisse in den jeweils ersten zwei Zeilen für die CIGRS-Werte der **Tafel 9** zeigen eine vernach-

Berechnungsannahme für		Jahreskosten \dot{K}_{ges} (DM/Jahr) bei Belegung mit					
		CIGRS-Werte			Schneider-Werte		
ϑ_a	φ_a	Milchküh.	Mastschw.	Mastkälb.	Milchküh.	Mastschw.	
1	HV-MH*	100 %	1464	1464	2433	—	—
2	HV-TRY1	100 %	1363	1394	2176	2787	4184
3	HM-TRY1	HM-TRY1	1301	1353	1980	2120	2798
4	TM-TRY1	TM-TRY1	1265	1315	1913	1969	2563
5	WM-TRY1	WM-TRY1	1249	1249	1782	1720	2351
6	HV-TRY1	MHM-TRY1	1302	1356	1951	1930	2677
7	HV-TRY1	85 %	1314	1369	1948	1916	2570
1	HV-MM	100 %	1629	1620	2792	—	—
2	HV-TRY9	100 %	1563	1562	2698	4005	5092
3	HM-TRY9	HM-TRY9	1514	1524	2474	2970	3690
4	TM-TRY9	TM-TRY9	1476	1486	2366	2660	3369
5	WM-TRY9	WM-TRY9	1382	1382	2254	2448	3136
6	HV-TRY9	MHM-TRY9	1529	1541	2484	2864	3625
7	HV-TRY9	85 %	1523	1537	2462	2703	3554

*) HV: Häufigkeitsverteilung; HM/TM/WM: Stunden-/Tages-/Wochenmittelwerte;
 MHM: Mittelwerte aus Stundenmittelwerten;
 TRY1/9: Testreferenzjahr Klimaregion 1/9.

Tafel 9. Minimale jährliche Gesamtkosten \dot{K}_{ges} zum Ausgleich der Wärmeenergiebilanz des Modellstalles bei Belegung mit Milchkühen, Mastschweinen bzw. Mastkälbern und bei unterschiedlichen Berechnungsannahmen für das Außenklima; CIGRS-Rechenwerte für die Belegung nach Tafel 2 bzw. Rechenwerte nach *Schneider*.

lässigbare Verringerung der minimalen Gesamtkosten um bis zu 100 DM (Ausnahme: Mastkälberstall im Klimagebiet 1 : 257 DM). Da die TRY-Datensätze Klimaregionen erfassen und für das gesamte Bundesgebiet zur Verfügung stehen, vor allem aber auch weil sie Werte für die wichtige Einflußgröße relative Feuchte enthalten, erfolgen die weiteren Untersuchungen allein mit den TRY-Erwartungswerten.

Mit den TRY-Stundenwerten für die relative Feuchte der Außenluft läßt sich überprüfen, ob der bisher verwendete DIN-Rechenwert von 100 % den Einfluß dieses Außenklima-Faktors ausreichend genau erfaßt. Die in Tafel 9 (CIGRS-Rechenwerte links und *Schneider*-Rechenwerte rechts) enthaltenen Ergebnisse (Vergleich von jeweils Zeile 2 und 3) weisen bei genauest möglicher Erfassung des Außenklimas mit Stundenmittelwerten für die mit den CIGRS-Werten weitgehend energieautarken Milchvieh- und Mastschweinställe vernachlässigbar kleinere Jahreskosten nach. Für den energieintensiven Mastkälberstall ergeben sich um etwa 200 DM geringere Jahreskosten, für die mit den *Schneider*-Werten besonders energieintensiven Ställe Verringerungen im Bereich 667–1402 DM. Die genaue Einbeziehung der Temperatur und relativen Feuchte der Außenluft führt also bei energieintensiven Ställen zu deutlich geringeren minimalen Jahreskosten.

Da diese genaue Bilanzierung lange Rechenzeiten erfordert und da andererseits für eine Stunde oder wenige Stunden auftretende Bilanzdefizite sicherlich nicht mit einer Heizung ausgeglichen werden (es sei denn, die Tiere haben einen sehr geringen Temperatur-Toleranzbereich), ist es notwendig und sinnvoll, für die Bilanzierung Tages- oder sogar Wochenmittelwerte zu verwenden. Die mit Tagesmittelwerten und mit den CIGRS-Werten erhaltenen Jahreskosten (jeweils 4. Zeile) sind nach Tafel 9 um bis zu 100 DM kleiner und damit zu vernachlässigen. Die Verringerungen bei der Verwendung von Wochenmittelwerten (jeweils 5. Zeile) bewegen sich im Bereich von 52–220 DM. Mit den *Schneider*-Rechenwerten ergeben sich Verringerungen im Bereich 151–321 DM (Tagesmittelwerte) bzw. im Bereich 400–554 DM (Wochenmittelwerte); jeweils bezogen auf die Werte der Zeile 3.

Eine weitere Möglichkeit, die Rechenzeit zu verringern, bietet die Verwendung von Häufigkeitsverteilungen für die Temperatur der Außenluft und von Mittelwerten für die relative Feuchte, die für die einzelnen Temperaturbereiche errechnet werden. Die Ergebnisse von Vergleichsuntersuchungen in Tafel 9 weisen nach, daß sich

mit diesen Rechenwerten (jeweils 6. Zeile), wie auch mit dem praxisnäheren konstanten Rechenwert für die relative Feuchte von 85 % (jeweils 7. Zeile), die mit den Stundenmittelwerten erhaltenen Jahreskosten (jeweils 3. Zeile) gut annähern lassen.

Die Bemessung der Wärmedämmung kann daher, sofern sich die Verwendung von im Laufe des Jahres konstanten Tagesmittelwerten für den Wärme- und Wasserdampfanfall rechtfertigen läßt, mit Häufigkeitsverteilungen für die Außentemperatur und mit zugeordneten Mittelwerten oder mit einem konstanten Wert von 85 % für die relative Feuchte erfolgen. Bei der Verwendung von Tagesmittelwerten ergeben sich bei besonders energieintensiven Ställen i.a. nicht vernachlässigbare Verringerungen der Jahreskosten.

4.4 Überprüfung des Einflusses von Veränderungen des Wärme- und Wasserdampfanfalls und der Stalltemperatur im Laufe des Tages bzw. Jahres

Die Ergebnisse der Untersuchungen zu den Veränderungen des Wärme- und Wasserdampfanfalls und der Stalltemperatur im Laufe eines Tages bzw. Jahres enthält die **Tafel 10**. Es zeigt sich (jeweils Vergleich von Zeile 1 und 2), daß die Erfassung der aktivitätsbedingten Veränderungen des Wärme- und Wasserdampfanfalls im Laufe eines Tages bei dem mit den *Schneider*-Werten energieintensiven Mastschweinstall zu um 1078 (Klimaregion 1) bzw. 733 DM (Klimaregion 9) höheren minimalen Jahreskosten führt. Mit den CIGRS-Werten, also für einen weitgehend energieautarken Mastschweinstall, ergeben sich nur um 152 bzw. 183 DM höhere Kosten.

TRY	Veränderungszeitraum und Art des Rechenwertes für			Jahreskosten \dot{K}_{ges} (DM/Jahr)	
	M	\dot{Q}_{St, m_w}	ϑ_i (°C)	CIGRS	SCHN
1	konst.	konst.	16	1353	2798
	konst.	Tag: HM	16	1505	3876
	Jahr: HM	Jahr: HM	16	1592	3873
	Jahr: TM	Jahr: HM	16	1597	3886
	Jahr: TM	Jahr: HM	20–18–16	1776	4132
9	konst.	konst.	16	1524	3690
	konst.	Tag: HM	16	1707	4423
	Jahr: HM	Jahr: HM	16	1803	4560
	Jahr: TM	Jahr: HM	16	1807	4618
01.01.*	Jahr: TM	Jahr: HM	20–18–16	2048	4934
01.02.*				1861	5156
01.03.*				1842	5025
01.04.*				1973	4785

*Beginn der Schweinemast

Tafel 10. Minimale jährliche Gesamtkosten \dot{K}_{ges} zum Ausgleich der Wärmeenergiebilanz des Modellstalles bei Belegung mit Mastschweinen und bei unterschiedlichen Annahmen für den Wärme- und Wasserdampfanfall sowie die Temperatur im Stall im Laufe eines Tages bzw. Jahres; Rechenwerte für die Belegung nach CIGRS bzw. *Schneider*. Stundenmittelwerte für die Temperatur und relative Feuchte der Außenluft in den Klimaregionen TRY1 und 9; HM/TM: Stunden-/Tagesmittelwerte.

Die Simulation der in Abhängigkeit von der Tiermasse auftretenden Veränderungen des Wärme- und Wasserdampfanfalles im Laufe eines Jahres enthält ebenfalls die Tafel 10. Der Einfluß der im Laufe des Produktionszeitraumes zunehmenden Tiermasse (jeweils Vergleich von Zeile 3 und 2) führt danach zu weiteren, aber geringeren Zunahmen der Jahreskosten um 87 bzw. 96 DM (CIGR-Werte) und 137 DM (*Schneider*-Werte, Klimaregion 9) Für die Klimaregion 1 ergibt sich mit den *Schneider*-Werten eine Abnahme um 3 DM. Die genauere Berücksichtigung von Veränderungen des Wärme- und Wasserdampfanfalls mit Stundenmittelwerten (jeweils Vergleich von Zeile 3 und 4) ist nicht erforderlich. Die im Laufe des Produktionszeitraumes notwendige Anpassung der Stalltemperatur (20–18–16, Zeile 5 im Vergleich mit Zeile 3) führt ebenfalls zu einer weiteren Zunahme der minimalen Jahreskosten um 184 bzw. 245 DM (CIGR-Rechenwerte) sowie 259 bzw. 374 DM (*Schneider*-Werte). Die allein für die Klimaregion 9 vorgenommenen Berechnungen für verschiedene Einstall-Daten ergeben Unterschiede in den Jahreskosten von etwa 200 (CIGR-Werte) bzw. 370 DM (*Schneider*-Werte).

Die Einbeziehung der Veränderungen des Wärme- und Wasserdampfanfalls sowie der Temperatur im Stall im Laufe eines Tages bzw. Jahres führt also – im Gegensatz zur genaueren Erfassung der beiden Außenklima-Faktoren – zu einer Erhöhung der minimalen Jahreskosten, die insbesondere bei dem mit den *Schneider*-Werten als energieintensiv ausgezeichneten Stall nicht vernachlässigbar ist. Diese Erhöhung der Jahreskosten gleicht dabei für den mit den *Schneider*-Werten charakterisierten Stall die Verringerung als Folge der genauen Erfassung der Außenklima-Faktoren fast wieder aus. Damit läßt sich allerdings ein Verzicht auf die genaue Erfassung des Außenklimas und des Wärme- und Wasserdampfanfalls im Stall nicht rechtfertigen.

Aus diesen Untersuchungen folgt vielmehr die Notwendigkeit, auch für andere, vor allem aber für energieintensive Belegarten zu überprüfen, inwieweit für die Bemessung der Wärmedämmung eines Stalles Veränderungen des Wärme- und Wasserdampfanfalls im Laufe eines Tages bzw. Jahres als Folge von Änderungen der Tieraktivität bzw. der Tiermasse oder Tierleistung explizit zu erfassen sind oder ob sich geeignete Mittelwerte bilden lassen. Dies gilt auch für eine produktionsbedingt notwendige Veränderung der Stalltemperatur im Laufe eines Jahres.

5. Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, daß eine auf dem Ausgleich der Wärmestrombilanz beruhende Dimensionierung der Wärmedämmung von Ställen, wenn sie überhaupt ein realisierbares Ergebnis bringt, zu unwirtschaftlichen Dämmschichtdicken führt. Die Hauptursache dafür liegt in dem Bemessungsverfahren selbst, z.T. aber auch in den Rechenwerten für den Wärme- und Wasserdampfanfall im Stall sowie für die Temperatur und relative Feuchte der Außenluft.

Der in der Neufassung der DIN 18910 enthaltene Hinweis, daß sich die DIN-Rechenwerte für den Wärme-, Wasserdampf- bzw. Kohlendioxidanfall auf Tageszeiten geringer Aktivität im Stall beziehen, weist diese Rechenwerte als für die Bemessung der Wärmedämmung von Ställen nicht geeignet aus. Da die Wärmedämmung der Stallhülle die Wärmestrombilanz des Stalles den ganzen Tag über beeinflußt, sind zumindest Tagesmittelwerte erforderlich. Vergleichsberechnungen mit den in einem CIGR-Bericht angegebenen und mit den von *Schneider u. Müller* ermittelten Tagesmittelwerten zeigten allerdings keine einheitliche Tendenz in der Aussage über die wirtschaftlichsten Dämmschichtdicken. Die erhaltenen Werte sind z.T. kleiner, z.T. größer als die mit den DIN-Rechenwerten ermittelten Dämmschichtdicken.

Mit vom Deutschen Wetterdienst für insgesamt 12 Klimaregionen im Bundesgebiet und für die 8760 Stunden des Jahres zur Verfügung gestellten Erwartungswerten für die Temperatur und relative Feuchte der Außenluft wurde weiterhin überprüft, ob die Berechnungsannahmen der DIN den Einfluß dieser Klimafaktoren ausreichend genau erfassen. Diese Überprüfungen führten zu dem Ergeb-

nis, daß die Außentemperatur und die relative Feuchte im Außenraum differenziert in die Berechnungen einzubeziehen sind. Die Bemessung der Wärmedämmung von Ställen kann mit Häufigkeitsverteilungen für die Außentemperatur sowie mit Mittelwerten für die relative Feuchte der Außenluft, die den einzelnen Temperaturbereichen dieser Verteilung zugeordnet sind, oder mit einem konstanten Rechenwert von 85 % erfolgen. Dazu ist es allerdings notwendig, daß der Wärme- und Wasserdampfanfall mit konstanten Tagesmittelwerten angegeben werden kann.

Untersuchungen zum Einfluß von Veränderungen des Wärme- und Wasserdampfanfalls sowie der Stalltemperatur im Laufe eines Tages bzw. Jahres zeigten andererseits für den Mastschweineestall, daß sich diese Einflußgrößen nicht mit Tages- oder Jahresmittelwerten erfassen lassen, insbesondere dann nicht, wenn die Belegung des Stalles energieintensiv ist. Es sind deshalb weitere grundlegende Untersuchungen zu diesen Berechnungsannahmen auch bei anderen Belegarten erforderlich, um bei der Bemessung der Wärmedämmung zu praxisgerechten Ergebnissen zu kommen. Es ist andererseits bei der Einordnung der Ergebnisse für den winterlichen Wärmeschutz immer zu bedenken, daß ein Mindest-Wärmeschutz zur Vermeidung von Oberflächenkondensation und damit als Feuchteschutz notwendig ist und daß gerade die Wärmedämmung der Dachdecke auch Wärmeschutz im Sommer bedeutet [18]. Es können daher gegebenenfalls größere als die für den Wärmeschutz im Winter errechneten Dämmschichtdicken notwendig sein.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Berechnungs- und Planungsgrundlagen für das Klima in Ställen.
AEL-Schriftenreihe Heft 17/1982. Essen: Arbeitsgemeinschaft Elektrizitätsanwendung in der Landwirtschaft (AEL), 1982.
- [2] DIN 18910: Klima in geschlossenen Ställen – Wasserdampf- und Wärmehaushalt im Winter, Lüftung, Beleuchtung. Berlin: Beuth-Vertrieb, 1974.
- [3] DIN 18910 (Entwurf): Klima in geschlossenen Ställen – Bemessung der Lüftung, Wärmedämmung und Beleuchtung – Planungsgrundlagen. Berlin: Beuth-Vertrieb, 1987.
- [4] *Englert, G.*: Wirtschaftliche Optimierung der Wärmedämmung von Ställen. Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 4, S. 109/16.
- [5] *Englert, G.*: Ein Rechenmodell für die Wärmeenergiebilanz von Ställen. Grundl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 5, S. 170/74.
- [6] Testreferenzjahr.
Offenbach: Programmbibliothek des Deutschen Wetterdienstes.
- [7] *Englert, G.*: Lüftungstechnische und energetische Aspekte der Klimatisierung von Ställen im Winter. Grundl. Landtechnik Bd. 35 (1985) Nr. 1, S. 1/6.
- [8] *Borchert, K.-L.*: Berechnung des Wärmebedarfs geschlossener Ställe – Vorschläge zur Änderung der DIN 18910. ILB-Institutsbericht Nr. 54. Braunschweig: Institut für landwirtschaftliche Bauforschung (ILB) der FAL, 1987.
- [9] CIGR-Arbeitspapier: Climatization of Animal Houses. Aberdeen: CIGR and SFBIU, 1984.
- [10] *Strøm, J.S.*: Heat loss from cattle, swine and poultry for design of environmental control systems in livestock buildings. SBI – Landbrugsbyggeri 55. Hörsholm: Statens Byggeforskningsinstitut, 1978.
- [11] *Schneider, B. u. W. Müller*: Stellungnahme zur Neufassung der DIN 18910 (1987).

- [12] *Schneider, B. u. W. Müller:* Zur Frage des Wärme-, Wasserdampf- und CO₂-Anfalls in Schweinemast- und Milchviehställen. Tierärztliche Umschau Bd. 40 (1985) Nr. 9, S. 682/88.
- [13] *Niethammer, F.:* Messen und Berechnen von Luftmassenströmen in Luftförderanlagen. Vortrag bei einer Tagung des Förderkreises Stallklima am 17.9.1987 in Kleve.
- [14] *Abshoff, A.:* Stallklima-Ansprüche und technische Ausführungen. Baubriefe Echem Nr. 19, S. 13/18. Echem: Lehr- und Versuchsanstalt für Viehhaltung, 1977.
- [15] • *Ergebnisse und Auswertungen der Fleischleistungsprüfung 1986.* Schriftenreihe des Landeskuratoriums der Erzeugerringe für tierische Veredelung in Bayern e.V. München: 1986..
- [16] *Heindl, W.:* Zum instationären Verhalten von Wärmebrücken. Bauphysik Bd. 4 (1982) Nr. 4, S. 145/46.
- [17] *Janssen, J. u. F. Schoedder:* Ableitung von Luftzustandsgrößen aus meteorologischen Daten. Grndl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 3, S. 81/90.
- [18] *Englert, G.:* Kennwerte für den wirtschaftlichen Wärmeschutz. Bayer. Landw. Jahrbuch Bd. 64 (1987) Nr. 4, S. 433/39.

Verdichtung und Expansion von Halmgut

Von Klaus-Peter Wolf-Regett, Braunschweig*)

DK 631.364:633.004.12

Die hohen Expansionskräfte von quaderförmigen Großballen stellen besonders hohe Anforderungen an die Bindeapparate von Großballen-Kolbenpressen und an die Zugfestigkeit der Ballenbindemittel. Da sich die Zugfestigkeit des Bindemittels aus Material- und Kostengründen nicht beliebig steigern läßt, gewinnt die Frage, wie der das Ballenbindemittel belastende Expansionsdruck im Ballen reduziert werden kann, eine besondere Bedeutung für weitere Entwicklungsanstrengungen auf dem Gebiet der Großballen-Kolbenpressen.

In diesem Beitrag wird über eine Forschungsarbeit berichtet, die sich neben der Verdichtung in erster Linie mit dem Verhalten des Halmgutes nach dem Verdichtungs Vorgang befaßt. Es wird die verwendete Versuchsanordnung sowie deren Meß- und Auswertetechnik vorgestellt und über die wesentlichen Forschungsergebnisse berichtet.

1. Einleitung

Mit der Einführung der Großballenpressen in den 70er Jahren wurde ein neuer Ansatz für die Mechanisierung der Ballenbergrung bei der Halmguternte geschaffen. Die auf der Grundlage der frontladergerechten Balleneinheit erreichte Vollmechanisierung führte zu einer raschen Fortentwicklung und Verbreitung der Großballenpressen.

Neben den Großballen-Rollpressen, deren Produktionszahlen mittlerweile in der gleichen Größenordnung wie die der Hochdruckpressen liegen, gewinnen die Großballen-Kolbenpressen, trotz der relativ hohen Investitionskosten, eine ständig zunehmende Bedeutung. Die Gründe hierfür sind:

- Der quaderförmige Ballen stellt hinsichtlich der Ausnutzung der Transport- und Lagerraumkapazität die optimale Ballenform dar.
- Die erreichbaren Ballendichten sind mit etwa 150 kg/m³ bei Stroh um 30–40 % höher als bei Rollballen.
- Die erweiterten Einsatzmöglichkeiten; neben der Stroh- und Heubergung ist auch die Bereitung von Anwelksilage in Form der Ballensilage möglich.

Für die Konstruktion und den Einsatz von Großballen-Kolbenpressen, die auch als Großballen-Packenpressen oder Rechteck-Großballenpressen bezeichnet werden, stellen die aus der großen Ballenquerschnittsfläche resultierenden hohen Expansionskräfte der quaderförmigen Großballen ein besonderes Problem für die automatischen Bindeapparate und das Ballenbindemittel dar. Bei den heutigen Pressenkonstruktionen wird die maximal erreichbare Ballendichte häufig nicht durch das Preßvermögen der Presse, sondern durch die Zugfestigkeit des Ballenbindemittels begrenzt. Da sich die Zugfestigkeit aus Material- und Kostengründen nicht beliebig steigern läßt, ist für die Weiterentwicklung von Großballen-Kolbenpressen die Kenntnis der im Ballen auftretenden Expansionskraft und ihrer Abhängigkeiten von den Konstruktionsparametern der Presse und von den Parametern des Halmgutes von großem Interesse. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Eigenschaften von Halmgut nach der Verdichtung näher zu untersuchen.

2. Aufgabenstellung und Forschungsumfang

In einer Normaldruck-Ballenpresse wird das Halmgut portionsweise zu Preßpaketen in den Preßkanal gepreßt und dort nach der Verdichtung durch die Seitenwandreibkräfte (und z.T. zusätzlich durch mechanische Elemente) zusammengehalten. Jedes Preßpaket verweilt eine bestimmte Zeit, die von mehreren Konstruktions- und Betriebsparametern abhängig ist, im Preßkanal und wird anschließend im abgebundenen Ballen ausgeschoben. Während des Aufenthaltes im Preßkanal wird das Preßpaket aufgrund des sich periodisch wiederholenden Verdichtungs Vorganges in mehrmaligem Wechsel entweder bei konstanter Preßdichte zusammengehalten – die Relaxation bewirkt in dieser Phase eine Absenkung des Verdichtungsdruckes über der Zeit – oder mit einem annähernd konstanten Verdichtungsdruck beaufschlagt – die Nachverdichtung bewirkt in dieser Phase einen Anstieg der Preßdichte über der Zeit –. Die konstruktiv bedingte Fadenlose der automatischen Bindeapparate ermöglicht anschließend beim Ausschub des Ballens aus dem Preßkanal eine teilweise Expansion der Preßpakete.

*) Dipl.-Ing. K.-P. Wolf-Regett ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. H.J. Matthes) der TU Braunschweig