

Stallklimaberechnung mit EDV

Grafische Methode zur Bestimmung von Stallklima, Lüftung und Wärmedämmung

Ludo Van Caenegem, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), CH-8356 Tänikon

Das Stallklima ist nicht nur für das Wohlbefinden der Tiere und Menschen, sondern auch für die Langlebigkeit der Gebäude von grosser Bedeutung. Fehler bei der Dimensionierung oder Handhabung von Zu- und Abluftöffnungen, Lüftern,

Heizungen, Wärmetauschern und Wärmepumpen mit als Folgen ungenügender Luftqualität oder Bauschäden (Kondenswasserbildung) lassen sich vermeiden, wenn die richtigen Zusammenhänge zwischen Aussenklima, Wärmedäm-

mung, Tierbelegung, Aufstallungssystem und Stallklima erkannt werden.

Ein neues, an der FAT entwickeltes interaktives EDV-Programm erlaubt die grafische Darstellung dieser Zusammenhänge.

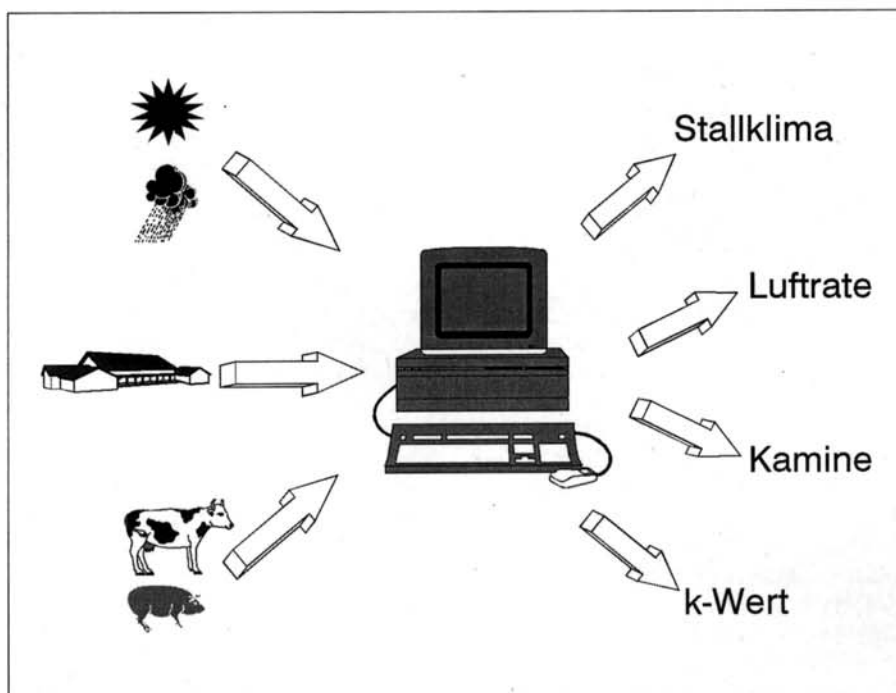


Abb. 1. EDV-unterstützte grafische Darstellung des Stallklimas.

Inhalt	Seite
Problemstellung	2
Energiebilanzgleichung	2
EDV-Berechnung	3
Berechnungsbeispiel	
Eingaben – Ergebnisse	4
Schlussfolgerungen	11

Problemstellung

Ein gesundes Stallklima hängt nicht sosehr von der Stalltemperatur, als vielmehr von einer ausreichenden Luftqualität ab. Neue Erkenntnisse erlauben eine bessere Einsicht in die komplexen Zusammenhänge zwischen einerseits der erforderlichen Lüftungsrate und andererseits der Wärmedämmung der Bauhülle, der Belegungsdichte, dem Aufstallungssystem sowie dem Aussen- und Innenklima. Das neue EDV-Programm ermittelt durch eine grafische Darstellung ein dynamisches Bild dieser Zusammenhänge.

Energiebilanzgleichung

Die Temperatur, relative Feuchtigkeit und Gaskonzentrationen im Stallgebäude sind vom Aussenklima und von baulichen, tier- und aufstallungsbedingten Einflussfaktoren abhängig. Die Einwirkung dieser Parameter lässt sich mit Hilfe der Energiebilanzgleichung untersuchen.

Wärmezufuhr (Tiere + Tiefstreue + Fremdenergie) – Wärmeabfuhr (Bauhülle+Lüftung) = 0

$$H_s + H_m + H_e - Q_T - Q_L = 0$$

Wenn keine Fremdenergie zugeführt wird ($H_e = 0$), ist die Energiebilanz ausgeglichen für:

$$H_s + H_m = Q_T + Q_L$$

oder $H = Q$ mit $H = H_s + H_m$ und $Q = Q_T + Q_L$

Temperaturabhängige Wärmezufuhr durch Tiere (H_s) und Tiefstreue (H_m)

Die Wärmeproduktion hängt von der Belegung (Tierart, Tierzahl x Tiergewicht), der Leistung (Zuwachs, Milchleistung) und der Stalltemperatur ab. Ein Teil der Wärme wird unter fühlbarer Form, der andere Teil unter latenter Form abgegeben. Die fühlbare Wärme ist die Wärme, welche tatsächlich an die Umgebung abgegeben wird. Die latente Wärme ist die Energie, wel-

Relative Gesamt- (H_p), fühlbare (H_s) und latente (H_l) Wärme als Funktion der Umgebungstemperatur.
Gesamtwärme bei 20 °C = 100%

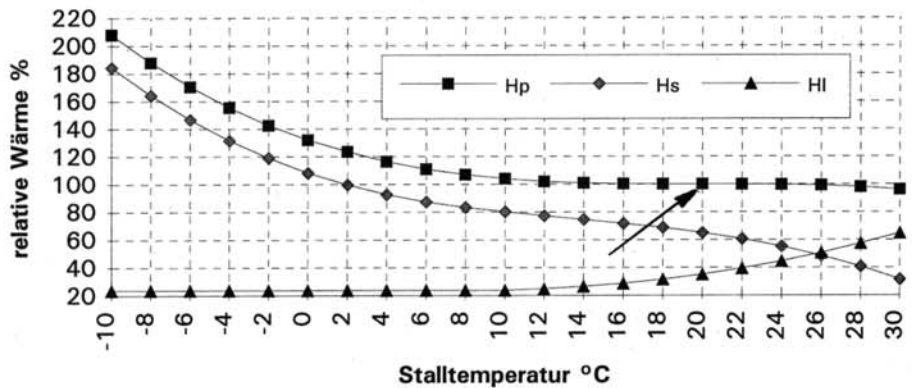


Abb. 2. Sowohl die Gesamtwärme der Tiere als auch die Aufteilung in fühlbare und latente Wärme sind temperaturabhängig.

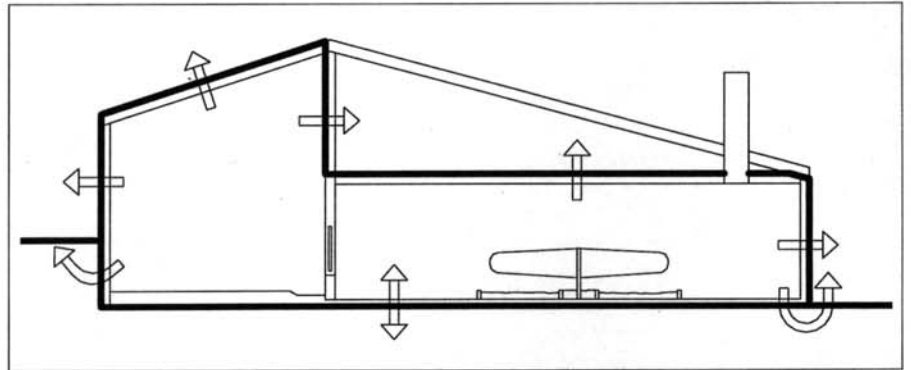


Abb. 3. Auch die Wärmeverluste in den Bodenrandbereichen und der Wärmeaustausch mit dem Boden werden erfasst.

che das Tier zur Erzeugung von Wasserdampf (Atmung und Transpiration) aufwendet.

Sowohl die Gesamtwärme als auch der Anteil der fühlbaren Wärme steigt, wenn die Stalltemperatur abnimmt (Abb. 2).

Neben der direkten Wärmeabgabe der Tiere kommt auch Wärme durch (aerobe) bakterielle Tätigkeit in der Tiefstreue frei. Ein Teil dieser Energie wird für die Verdampfung von Wasser aufgewendet, ein anderer Teil wird oberflächlich an die Stallluft abgegeben.

Wärmeabfuhr durch die Bauhülle (QT) nicht nur Wärmeverluste durch Wände und Decke

Die Wärmeverluste durch die Bauhülle setzen sich aus verschiedenen Teilbe-

reichen zusammen (Abb.3). Der Wärmetransport durch Bauteile in Kontakt mit der Aussenluft (Wände, Dach) lässt sich relativ exakt und auf einfache Weise ermitteln. Die Transmissionsverluste durch Innenwände und Randzonen im Boden-Wand-Bereich können dagegen nur annähernd und mit grossem rechnerischem Aufwand bestimmt werden. Die Ermittlung des Wärmeaustausches (Wärmeverluste und -rückfluss) mit dem Boden erfordert die Kenntnis des Untergrundes (Temperaturleitfähigkeit).

Bei hohen Aussentemperaturen wird zeitweise Wärme aus der Umgebung in den Stall zurückfliessen. Besonders zu berücksichtigen ist in Hallenställen (ohne Decke) die Wärmeindringung (bis 400 W/m²) durch das unisolierte Dach, welches der Sonnenstrahlung ausgesetzt ist.

Berechnungsbeispiel

Das Berechnungsbeispiel bezieht sich auf einen deckenlastigen Anbindestall für 23 GVE (Abb. 5). Da alle wichtigen Parameter als Funktion der Stalltemperatur ausgedrückt sind, sind auch Berechnungen für nicht wärmege-dämmte Ställe (sogenannte Aussenklima-ställe) möglich.

Eingaben in fünf Masken

Maske: «Objektdaten Eingeben»

Diese Maske beinhaltet Verwaltungsdaten (Abb. 6).

Maske: «**Klima und Topografische Daten**» (Abb. 7)

In der Regel startet man die Stallklimaberechnungen für die minimale Aussentemperatur, welche nach den Agrarmeteorologischen Blättern der Schweiz normalerweise einmal pro Jahr an diesem Ort gemessen wird (Kältekennwert). Bei weiteren Berechnungen kann man unter «Kältekennwert» beliebige Aussentemperaturen unter 20°C eingeben.

Für die relative Feuchtigkeit draussen wird im Winter in der Regel 95 % angenommen.

Die relative Feuchtigkeit innen wird am Anfang geschätzt (zum Beispiel 80 %) und muss später aufgrund der Energiebilanz korrigiert werden.

Die Anfangstemperaturdifferenz ist die minimale Differenz zwischen Stalltemperatur und Kältekenwert, für welche die Berechnungen ausgeführt werden. Ihre Addierung zum Kältekenwert ergibt den Anfangswert der X-Achse der Grafiken (Winter, Wärmetauscher und Wärmepumpe). Das «Intervall» bestimmt die Skalierung der X-Achse derselben Grafiken.

Die Sommerkennwerte haben eine analoge Bedeutung wie die Winterkennwerte.

Die Höhe über Meer beeinflusst die spezifische Luftdichte und die mittlere Bodentemperatur.

Maske «**Gebäudedaten**» (Abb. 8)

Diese Daten dienen zur Berechnung der Wärmeverluste durch die Bauhülle (Transmission) und eines Teils der Ver-

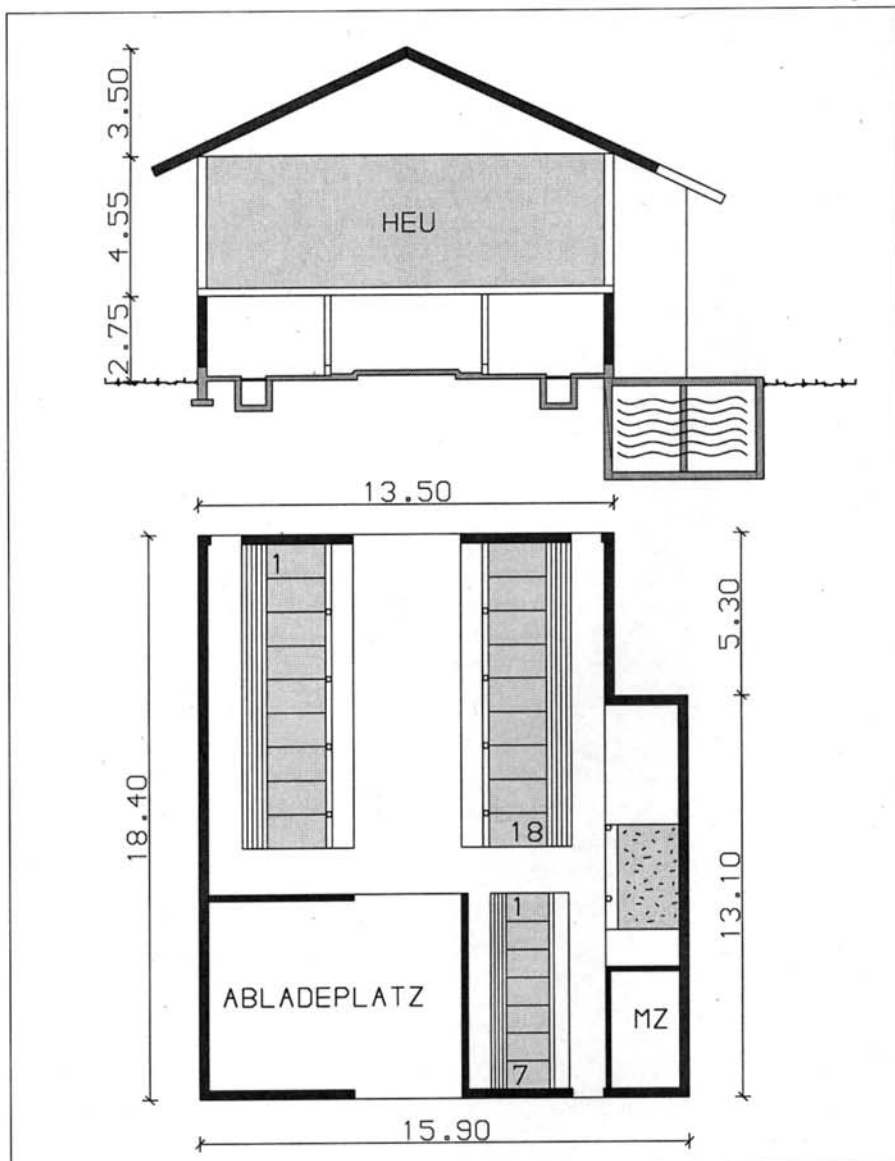


Abb. 5. Berechnungsbeispiel. Wärmegedämmter Anbindestall für 23 GVE.

Objektdatei eingeben

Objekt	Anbindestall
Name	FAT
Adresse	FAT
Ort	8356 Tänikon
Telefon	052/62.31.31
Verfasser	Ludo Van Caenegem
Datum Erfassung	25.10.94
Beschreibung	Testobjekt aus Preisbaukasten FAT

Abbrechen OK

Abb. 6. Eingabemaske. Verwaltungsdaten.

Wärmeabfuhr durch die Lüftung (QL) vom Aufstallungssystem abhängig

Die Wärmeverluste durch die Lüftung setzen sich aus der fühlbaren Wärme, nötig, um die eintretende Aussenluft auf die Stalltemperatur zu erhöhen, und aus der Energie für die Verdampfung von Wasser vom Boden und Mist (oberflächlich) zusammen.

Die Lüftungsrate muss im Winter so bemessen sein, dass die Wasserdampfmenge abgeführt werden kann, ohne dass die relative Luftfeuchtigkeit im Stall zu hoch wird und die Konzentration von Kohlenstoffdioxid 0,3 % (3000 ppm) überschreitet.

Zu hohe relative Luftfeuchtigkeit kann zu Kondenswasserbildung und längerfristig zu Bauschäden führen. Bei hohen Aussentemperaturen muss die Lüftung zusätzlich dafür sorgen, dass der Überschuss an Wärme abgeleitet wird.

Die Wasserdampfmenge, welche entsteht, hängt stark von der Temperatur und dem Aufstallungssystem ab. In Laufställen mit grossen feuchten Verkehrsflächen können beträchtliche Wassermengen vom Boden verdampfen (Abb.4).

EDV-Berechnung mit grafischer Darstellung

Grundlage für die Berechnungen ist die erwähnte Energiebilanz. Bei der Planung ist es wichtig zu wissen, welche Lüftungsrate und Wärmedämmung erforderlich sind, damit die erwünschte Temperatur und relative Feuchtigkeit im Stall erreicht werden können. Dabei darf keine Kondenswasserbildung auftreten und die CO₂-Konzentration den Grenzwert nicht überschreiten.

Wegen der Verflechtung der vielen Einflussfaktoren können diese Wärmedämmung und Lüftungsrate nur auf indirektem Wege, mit Hilfe eines Iterationsverfahrens, gefunden werden. Ohne EDV-Unterstützung sind solche Berechnungen sehr zeitaufwendig.

Das FAT-PC-Stallklimaprogramm beruht auf einer Tabellenkalkulation in Excell (Windows). Die Eingaben erfolgen in fünf Eingabemasken. Die Ergebnisse werden in 13 Grafiken dargestellt,

WASSERDAMPF VON TIERISCHEM UND NICHT-TIERISCHEM URSPRUNG

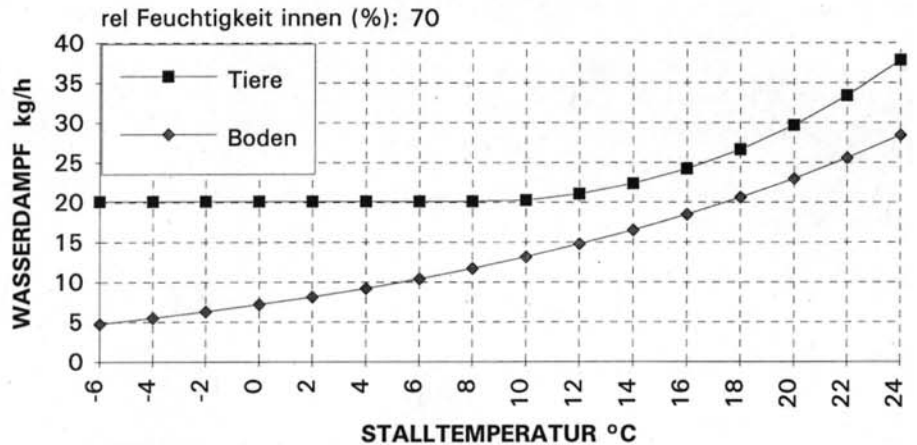


Abb. 4. Die Wasserdampfproduktion steigt stark bei Stalltemperaturen über 10°C an. In Laufställen mit grossen eingestreuten oder planbefestigten Verkehrsflächen verdampfen erhebliche Mengen Wasser vom Boden.

welche in vier Bereiche aufgegliedert sind:

Winter (gültig für Aussentemperaturen < 20°C)

- Wärmeproduktion und -verluste
- erforderliche Lüftungsrate (nach H₂O- und CO₂-Bilanz)
- erforderliche Zu- und Abluftöffnungen
- maximaler k-Wert zur Vermeidung von Kondensation

Sommer (gültig für Aussentemperaturen > 20°C)

- erforderliche Lüftungsrate (nach H₂O-, CO₂-, und Energie-Bilanz)
- erforderliche Zu- und Abluftöffnungen

Winter mit Wärmetauscher (WT)

- Energiebilanz mit und ohne Wärmetauscher
- erforderliche Wärmetauscherfläche
- Kondenswasseranfall
- Temperatur der Zu- und Fortluft

Winter mit Wärmepumpe (WP)

- Kühl-, Heiz-, Motor- und Nutzleistung bei Umluft WP
- Lüftungsrate aus H₂O- und E-Bilanz bei Umluft-WP
- Kühl-, Heiz-, Motor- und Nutzleistung bei Fortluft-WP

folgenden Erläuterungen vor allem auf diese sechs Grafiken.

Alle Berechnungen werden iterativ für eine Reihe von Stalltemperaturen (Temperaturzone) als Funktion von folgenden Parametern ausgeführt:

- Aussenklima (rel. Feuchtigkeit und Temperatur nach geographischer Lage)
- Relative Feuchtigkeit im Stall
- Bauhülle (Flächen, k-Werte)
- Aufstallungssystem (nasse Bodenflächen, Einstreu)
- Belegungsichte (Tierart, Gewicht, Anzahl, Leistung)
- Wärmerendement des Wärmetauschers (WT) (Kreuzstrom-Verfahren)
- Temperatursenkung der Umluft durch die Umluft-Wärmepumpe
- Temperatur der Fortluft nach der Fortluft-Wärmepumpe

Die Bandbreite der Stalltemperaturzone, für welche die Berechnungen ausgeführt werden, ist frei wählbar. In jeder Grafik werden die betreffende Aussentemperatur und die relative Feuchtigkeit im Stall erwähnt. Die WT-Berechnungen gelten für einen Kreuzstrom-Luft-Luft-Wärmetauscher.

Für Stallgebäude ohne Wärmetauscher oder Wärmepumpe sind nur die ersten sechs Grafiken von Bedeutung. Dies ist für die meisten Stallgebäude der Fall. Deshalb beschränken sich die

luste durch die Lüftung (Verdampfung von nassen und eingestreuten Bodenflächen).

Zusätzlich zu den Wärmeverlusten durch Wand-, Decke- oder Dach wird auch die Wärmeabgabe durch Perimeter (Boden-Wand-Anschluss) über und unter Terrain erfasst. Ebenfalls wird aufgrund von saisonalen Bodentemperaturen in 1 m Tiefe der Wärmeaustausch mit dem Boden berechnet.

Die nassen sowie die eingestreuten Stallflächen dienen nicht zur Berechnung der Transmissionsverluste, sondern zur Ermittlung der Wasserdampfproduktion von nicht tierischem Ursprung.

Maske «**Tierbestand**» (Abb. 9)

Die Wärmeproduktion wird aufgrund von C.I.G.R. - Formeln (Commission Internationale du Génie Rural) bestimmt. Dazu braucht es die Anzahl Tiere und ihr Gewicht. Wenn nichts anderes angegeben wird, gilt für Milchkühe eine Milchleistung von 15 kg/Tag, für Milchziegen 5 kg/Tag, Milchschafe 5 kg/Tag

Maske «**Default Werte**» (Abb. 10)

Die Maske enthält Durchschnittswerte, welche mangels genauerer Daten als Vorgaben vom Programm übernommen werden. Bei Bedarf kann man auch diese Werte der örtlichen Situation anpassen.

Winter		Sommer	
Kältekennwert	°C	-13	
relative Feuchtigkeit innen (75)	%	80	
Temp. Differenz X-Achse (2-10)	°C	3	
Interval X-Achse (0.5-2)	°C	2	
Wärmekennwert	°C	30	
relative Feuchtigkeit innen (60)	%	60	
Temp. Differenz X-Achse (1)	°C	1	
Interval X-Achse (0.5)	°C	0.25	
Höhe über Meer	m	530	

Buttons: Gebäude, Rinder, Schweine, Andere Tiere, Default, OK, Abbrechen

Bauhülle	k-Wert W/m2 K	Tiefe m	Fläche m2	Aussenper m
Wand an Aussenluft	0.5		139.68	
Wand gegen Innen	1		43.79	
Aussenperimeter unter Terrain	0.5	1.2		11.9
Aussenperimeter über Terrain				41.6
Decke	0.5		280	
Boden (wenn nicht isoliert k=5)	5		280	
Einfachverglasung			18	
Doppelverglasung			2	
Tore/Türen (wenn nicht isoliert k=2.2)	1		15	
nasse Bodenfläche			24	
Tiefstreu-/Tretmistfläche			7	
Dach (nur Teil ohne Decke)	0.5		0	

Buttons: Klima+Topogr, Rinder, Schweine, Andere Tiere, Default, OK, Abbrechen

Kategorie	Anzahl	Gewicht
Rinder		
Aufzuchtkälber (50 kg)	1	50
Aufzuchtkälber (100 kg)	5	120
Mastkälber (100 kg)	0	120
Mastrinder (300 kg)	0	400
Jungvieh Aufzucht (300 kg)	4	300
Jungvieh Aufzucht (500 kg)	3	500
Milchkühe (650 kg)	18	650
Zuchtstier (900 kg)	0	1000

Buttons: Klima+Topogr, Gebäude, Schweine, Andere Tiere, Default, OK, Abbrechen

Abb. 7, 8, 9. Eingabemasken. Klima und topografische Daten, Gebäudedaten, Rinder. Ähnliche Masken gibt es für Schweine und andere Tiere.

Ergebnisse grafisch dargestellt

Wintersituation

Die Energiebilanz wird iterativ für eine Reihe von Stalltemperaturen (Temperaturzone) berechnet. Gleichzeitig werden die Lüftungsrate und die erforderlichen Zu- und Abluftöffnungen (Schwerkraftlüftung) als Funktion der Stalltemperatur bestimmt. Aus einer vierten Grafik kann der maximale k-Wert zur Vermeidung von Kondensation abgelesen werden.

Wärmeproduktion H - Wärmeverluste Q

Die Kurve «H» stellt die fühlbare Wärmeproduktion der Tiere sowie der Tiefstreu- oder Tretmistflächen dar (Abb. 11). Sie nimmt zu, wenn die Stalltemperatur abnimmt. Kurve «Q» zeigt den Verlauf der Wärmeverluste durch Lüftung und Transmission. Bei tiefen Stalltemperaturen nehmen die Verluste durch die Lüftung stark zu. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Luft bei tiefen Temperaturen nur noch wenig Wasserdampf aufnehmen kann. Bei hohen Stalltemperaturen sind vor allem die Transmissionsverluste ausschlaggebend. Die Schnittpunkte der beiden Kurven («H» und «Q») stellen das Gleichgewicht zwischen Wärmeproduktion und Wärmeverluste für die gewählte relative Feuchtigkeit im Stall dar, unter der Voraussetzung, dass keine Fremdenergie zugeführt wird. Die entsprechenden Stalltemperaturen können in der X-Achse abgelesen werden (im Beispiel: -9°C und +12°C, bei einer relativen Feuchtigkeit im Stall von 80%). Die Differenz der beiden Kurven stellt das Wärmedefizit (rechts vom Schnittpunkt bei 12°C) bzw. den Wärmeüberschuss (links vom gleichen Schnittpunkt) dar.

Da die tiefere Stalltemperatur uninteressant ist, besteht der nächste Schritt darin, dass man die X-Achse in die Richtung höherer Stalltemperaturen verschiebt und gleichzeitig die Skalierung verfeinert. Dazu erhöht man in der Maske «Klima und Topografische Daten» unter Winter die «Temperatur Differenz Anfang» von 3 auf 18°C und verkleinert das «Intervall X-Achse» von 2 auf 0,5°C. Mit Hilfe einfacher Excel-

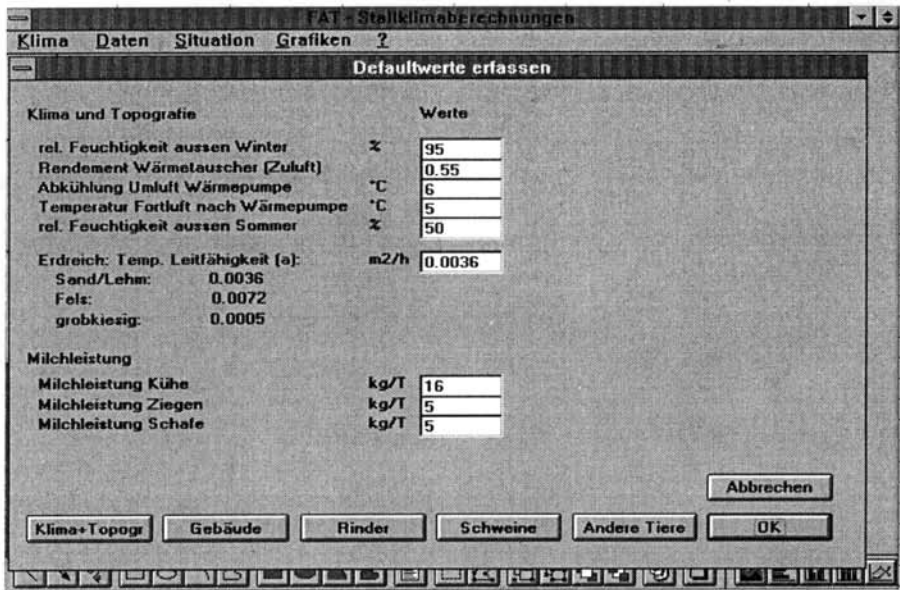


Abb. 10. Eingabemaske. Defaultwerte.

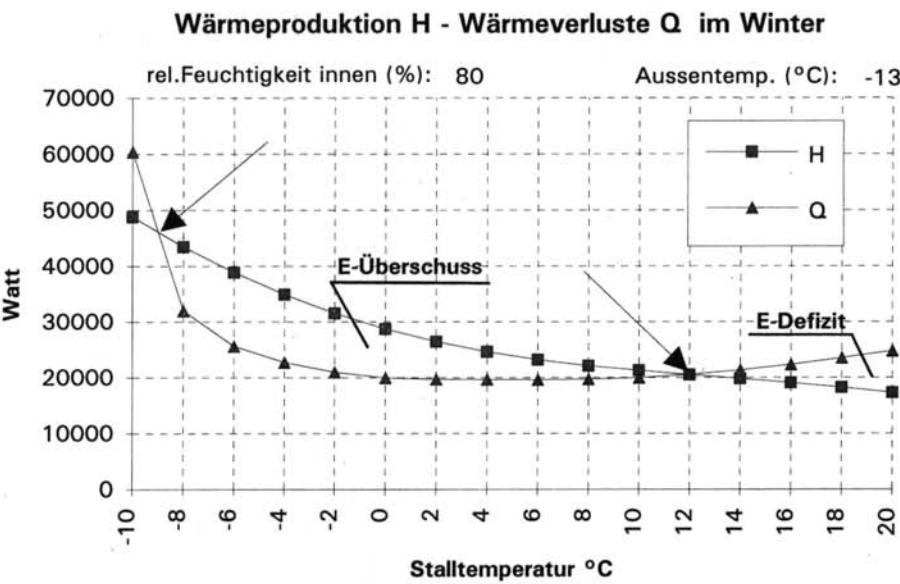


Abb. 11. Bei einer Aussentemperatur von -13°C und einer relativen Feuchtigkeit im Stall von 80 % pendelt sich die Stalltemperatur bei 12°C ein. (Schnittpunkt rechts der beiden Kurven).

befehle kann man ebenfalls die Skalierung der Y-Achse anpassen (Abb. 12a).

Lüftungsrate Winter nach Wasserdampf - (H₂O) und Gasbilanz (CO₂)

Die Lüftungsrate nach H₂O-Bilanz hängt von der produzierten Wasserdampfmenge im Stall ab. Je höher man die relative Feuchtigkeit im Stall wählt, desto kleiner wird die erforderliche Lüf-

tungsrate. Als Begrenzung gilt eine ausreichende Luftqualität (CO₂-Konzentration unter 3000 ppm). Im Beispiel beträgt bei 80 % relativer Feuchtigkeit und 12°C (Gleichgewichtstemperatur) die Lüftungsrate nach H₂O-Bilanz 1250 m³/h, diese nach CO₂-Bilanz dagegen 1900 m³/h (Abb. 12b). Die ursprüngliche geschätzte relative Feuchtigkeit (80 %) muss folglich soweit herabgesetzt werden, bis die H₂O-Kurve bei der Gleichgewichtstem-

Wärmeproduktion H - Wärmeverluste Q im Winter

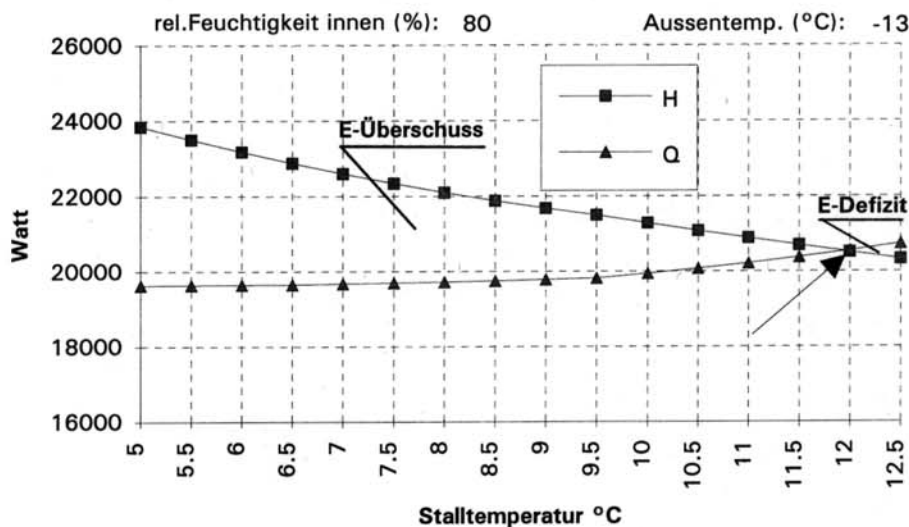
peratur deutlich über der CO_2 -Kurve liegt. Dies erreicht man, indem man in der Eingabemaske «Klima und Topografische Daten» schrittweise die relative Feuchtigkeit von 80 bis auf 73 % verringert. Die Gleichgewichtstemperatur nimmt dabei ab (von 12°C bis auf 8°C , Abb. 13a) und die erforderliche Lüftungsrate nach H_2O -Bilanz erhöht sich von $1250 \text{ m}^3/\text{h}$ bis auf $2050 \text{ m}^3/\text{h}$ (Abb. 13b).

Maximaler k-Wert zur Vermeidung von Kondensation

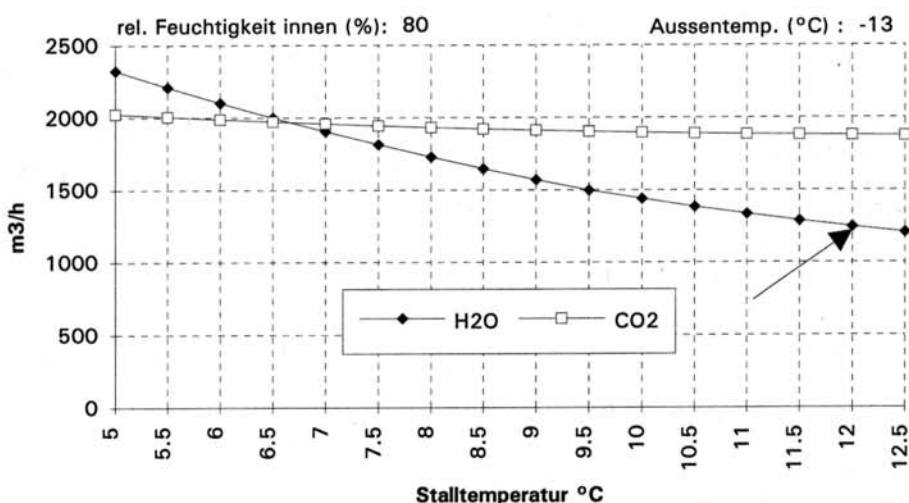
Für jede Stalltemperatur und relative Feuchtigkeit kann der maximale k-Wert zur Vermeidung von Kondensation bestimmt werden. Die Oberflächentemperatur von reflektierenden Materialien (zum Beispiel Aluminium) weicht durch die geringe Absorption stärker von der Umgebungstemperatur ab als diese von nicht reflektierenden Materialien. Deshalb erfordert eine solche Wand oder Decke einen kleineren k-Wert. Der k-Wert von schlecht umspülten Flächen (tote Ecken) kann diesem von reflektierenden Materialien gleichgestellt werden. Im Beispiel darf der k-Wert von gut umspülten Bauteilen $1,3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ nicht übersteigen (relative Feuchtigkeit im Stall 73 %). Wo keine Luftzirkulation stattfindet, darf der k-Wert höchstens $0,65 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ betragen (Abb. 14).

Kamin-Querschnitt (m^2) für Kaminhöhe d_h (m) im Winter. Dimensionierung der Schwerkraftlüftung

Für Schwerkraftlüftung kann man den minimalen Querschnitt für Abluftkamine oder Lüftungsfirst (Trauf-First-Lüftung) direkt für verschiedene Höhendifferenzen zwischen Zu- und Abluftöffnungen ablesen. Im Beispiel beträgt der erforderliche Querschnitt für eine Höhendifferenz von 6 m $0,32 \text{ m}^2$ (Abb. 13c) bei 73 % relativer Feuchtigkeit (Innentemperatur 8°C , Aussentemperatur -13°C). Wenn man den Querschnitt auf $0,18 \text{ m}^2$ begrenzt (Abb. 12c), kann man zwar die Stalltemperatur auf 12°C erhöhen, die CO_2 -Konzentration aber überschreitet massiv den Grenzwert von 3000 ppm. Die Schwerkraftlüftung soll für Rindviehställe von der minimalen Aussen-



Lüftungsrate Winter nach Wasserdampf (H_2O) und CO_2 -Bilanz



Kamin- (First-) Querschnitt für Kaminhöhe d_h (m) im Winter. Schwerkraftlüftung

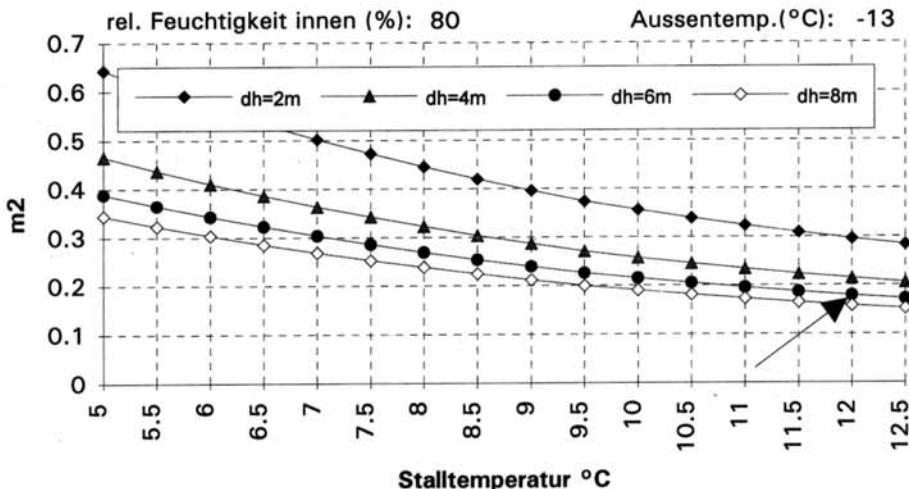


Abb. 12a, b, c. Hohe relative Feuchtigkeit (80 %) im Stall ist mit hohen Stalltemperaturen (12°C), (zu) niedrigen Lüftungsraten ($1250 \text{ m}^3/\text{h}$) und einem zu kleinen Kaminquerschnitt ($0,18 \text{ m}^2$) verbunden.

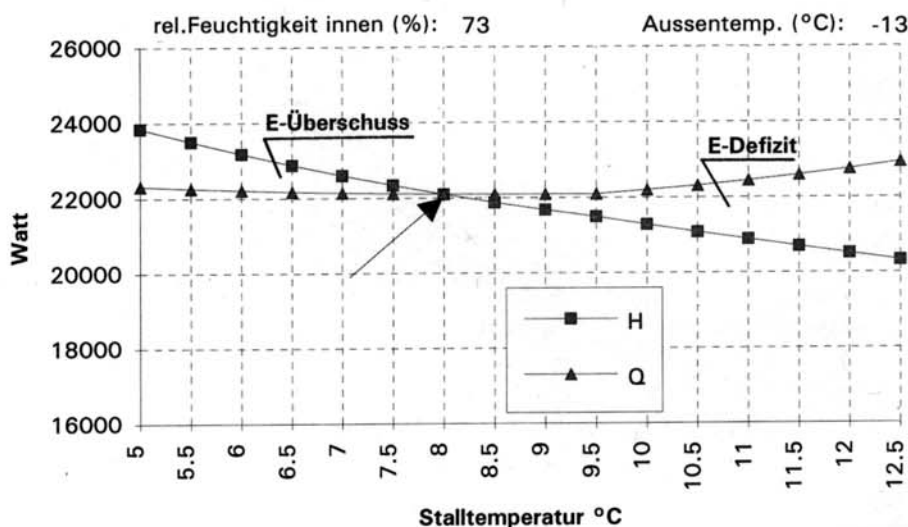
temperatur bis zu +5°C ausreichen. Bei Aussentemperaturen über 5°C kann in der Regel problemlos (zugfrei) zusätzlich durch Fenster und Tore gelüftet werden. Wo Querlüftung durch Tore und Fenster nicht oder nur beschränkt möglich ist, muss die Lüftung durch Lüfter unterstützt werden.

Eine Schwerkraftlüftung funktioniert desto besser, je grösser die Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen ist. Die mögliche Temperaturdifferenz nimmt bei steigender Aussentemperatur ab. Die Wiederholung der Stallklimaberechnungen (Tab. 1) zeigt, dass die erforderliche Lüftungsrate für Aussentemperaturen unter dem Gefrierpunkt ungefähr gleich bleibt. Bei steigender Aussentemperatur (>0°C) nimmt sie aber stark zu. Dementsprechend muss sich auch der Querschnitt der Zu- und Abluftöffnungen vergrössern.

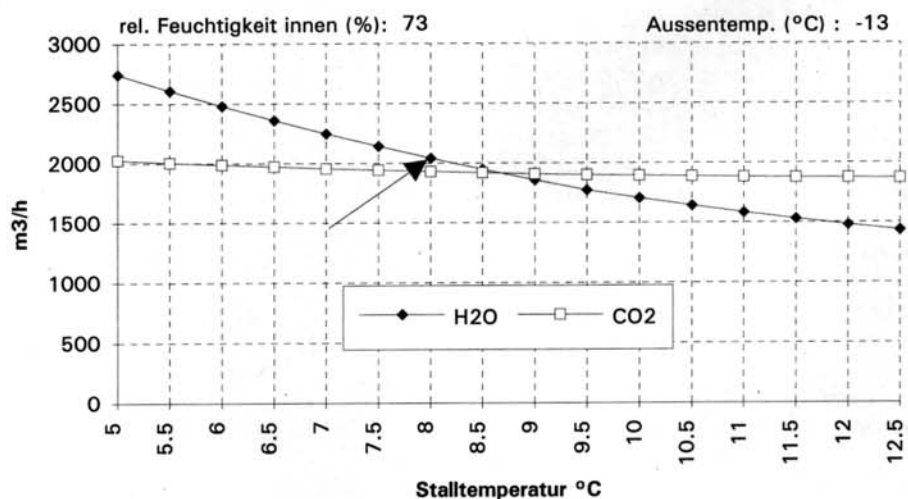
Daraus folgt, dass man die Schwerkraftlüftung nicht für die Minimaltemperatur, sondern für eine Aussentemperatur von + 5°C dimensionieren soll. Im Beispiel beträgt schlussendlich der erforderliche Kaminquerschnitt nicht 0,32 m², wie ursprünglich berechnet (für - 13°C), sondern 0,56 m² (für + 5°C). Bei tiefen Aussentemperaturen darf der Kaminquerschnitt höchstens um 40 % gedrosselt werden.

Laut Tabelle 1 genügt es, die Gefahr auf Kondenswasserbildung lediglich bei minimaler Aussentemperatur zu untersuchen. Die Temperaturdifferenz innen – aussen ist dann am grössten und der erforderliche k-Wert am geringsten.

Wärmeproduktion H - Wärmeverluste Q im Winter



Lüftungsrate Winter nach Wasserdampf (H₂O) und CO₂-Bilanz



Kamin- (First-) Querschnitt für Kaminhöhe dh (m) im Winter. Schwerkraftlüftung

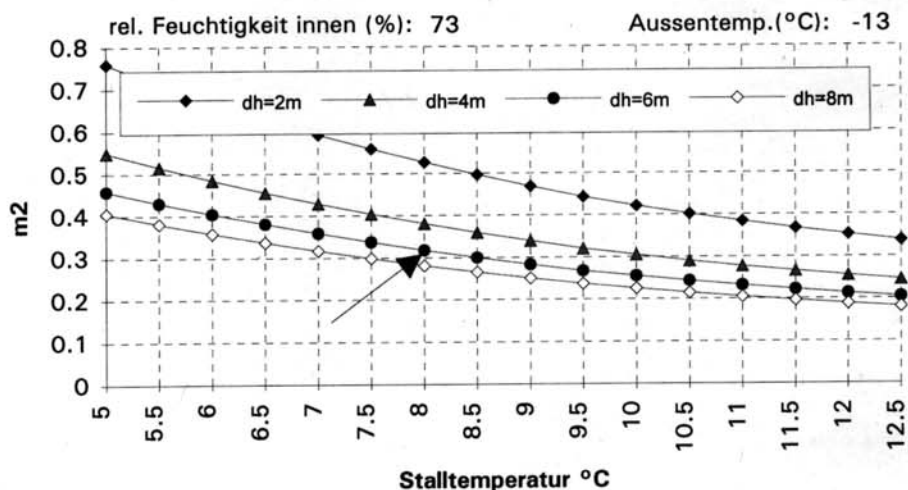


Abb. 13a, b, c. Eine Reduktion der relativen Feuchtigkeit auf 73 % erfordert eine höhere Lüftungsrate und einen grösseren Kaminquerschnitt. Hierbei reduziert sich die Stalltemperatur auf 8°C.

Sommersituation

Für die Beurteilung der Sommersituation stehen zwei Grafiken zur Verfügung.

Lüftungsrate Sommer nach Wasserdampf- (H₂O), Gas- (CO₂) und Energiebilanz (E)

Die Lüftungsraten nach H₂O- und CO₂-Bilanz werden auf analoge Weise wie für den Winter berechnet. Die Lüftungsrate nach Energiebilanz ist die Luftmenge, welche nötig ist, damit die in der X-Achse angegebene Stalltemperatur nicht überschritten wird. Sie folgt direkt aus der Energiebilanz, in welcher auch die Wärmeeindringung durch Sonnenstrahlung (Dach oder Decke) mitberücksichtigt wird. Die grössere der 3 Lüfraten ist massgebend für die Dimensionierung der Ab- und Zuluftöffnungen.

Bei einer Aussentemperatur von 30°C (relative Feuchtigkeit 50 %) sind im Beispiel 3300 m³/h nötig, damit die Stalltemperatur 31,5°C nicht übersteigt (Lüftungsrate nach Energiebilanz, Abb. 15). Dagegen erfordert die Einhaltung der erwünschten relativen Feuchtigkeit (60 %) bei der gleichen Stalltemperatur 7000 m³/h (Lüftungsrate nach H₂O-Bilanz). Die minimale Frischluftmenge (CO₂-Konzentration < 3000 ppm) beträgt lediglich 1850 m³/h.

Tabelle 1: Einfluss der Aussentemperatur (ta) auf die Temperatur (ti) und relative Feuchtigkeit (RFi) im Stall, die erforderliche Lüftungsrate nach H₂O-Bilanz, den Querschnitt der Zu- und Abluftöffnungen und den maximal zulässigen k-Wert (relative Feuchtigkeit aussen 95 %).

ta °C	ti °C	RFi %	Lufrate m³/h	Querschnitt m²	max. k-Wert W/m² K
-13	+8	73	2050	0.32	0.65
-5	+14	70	2000	0.34	0.85
0	+17	70	2250	0.40	1.00
5	+19	72	2850	0.56	1.20
10	+21	72	3700	(0.80)	1.45
15	+23	75	5500	(1.50)	1.75
20	+24	82	13000	(4.50)	2.20

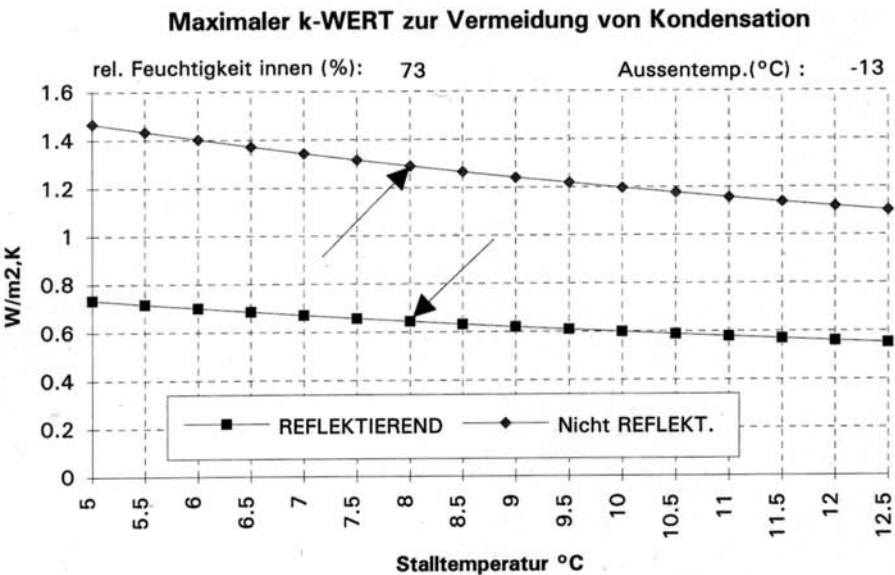


Abb. 14

Lüftungsrate Sommer nach Wasserdampf- (H₂O), Gas- (CO₂) und Energiebilanz (E)

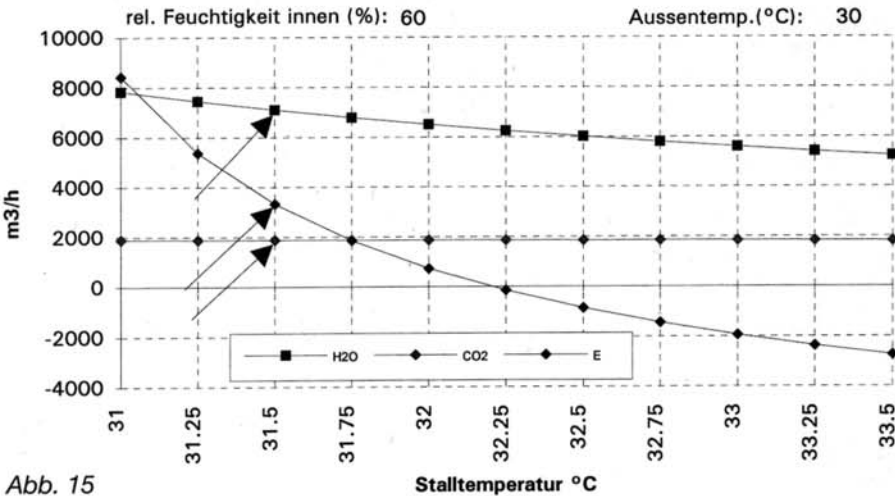


Abb. 14. Kondenswasserbildung lässt sich nur bei niedrigen k-Werten vermeiden.

Abb. 15. Die Lüftungsrate im Sommer soll gleichzeitig den Wasserdampf abführen, den Hitzestau und zu hohe CO₂-Konzentrationen verhindern.

Abb. 15

Zu- und Abluftöffnungen Sommer für Luftgeschwindigkeit v (m/s)

Bei natürlicher Lüftung ist man im Sommer auf Querlüftung durch Fenster und Tore angewiesen. In windstillen Gebieten kann man mit einer Luftgeschwindigkeit im Stall von 0,5 m/s rechnen. Der erforderliche Querschnitt der gegenüberliegenden offenen Türen oder Fenster kann in der Grafik abgelesen werden (Abb. 16). Bei mechanischer Lüftung lässt sich der erforderliche Querschnitt durch Inter- oder Extrapolation der Kurven 2 bis 5 m/s ermitteln. Der Steuerbereich der Ventilatoren soll im Beispiel zwischen 2000 (Winter) und 7000 m³/h (Sommer) liegen.

Wintersituation mit Wärmetauscher

Der Wärmetauscher bietet die Möglichkeit, die Aussenluft vorzuwärmen und somit die Stalltemperatur zu erhöhen. Hierbei kann nicht nur fühlbare, sondern auch latente Wärme (durch Kondensation) aus der Fortluft zurückgewonnen werden. Im Beispiel kann die Stalltemperatur bei 73 % relativer Feuchtigkeit von 8 auf 14°C erhöht werden (Abb. 17). Oberhalb 14°C ist auch der Wärmetauscher nicht mehr imstande, die Energiebilanz auszugleichen. Den Berechnungen zugrunde liegt die grössere der beiden Lüftungs-raten (nach H₂O oder CO₂). Die erforderliche Fläche steigt mit zunehmender Stalltemperatur. Aus wirtschaftlichen Gründen wird die Fläche nicht für die maximal erreichbare Stalltemperatur (14°C) ausgelegt (Abb. 18).

Abb. 16. Die 0,5-m/s-Kurve stellt die erforderlichen Ab- und Zuluftöffnungen bei natürlicher Lüftung dar. Durch Extrapolation der Kurven 2 und 5 m/s kann der Querschnitt dieser Öffnungen bei Einsatz eines Lüfters bestimmt werden.

Abb. 17. Durch den Einsatz des (Kreuzstrom-) Wärmetauschers kann die Stalltemperatur (bis auf 14°C) erhöht werden.

Abb. 18. Aus wirtschaftlichen Gründen wird die Fläche nicht für die maximal erreichbare Temperatur (14°C) ausgelegt.

Zu-/ Abluftöffnungen Sommer (m²) für Luftgeschwindigkeit v (m/s)

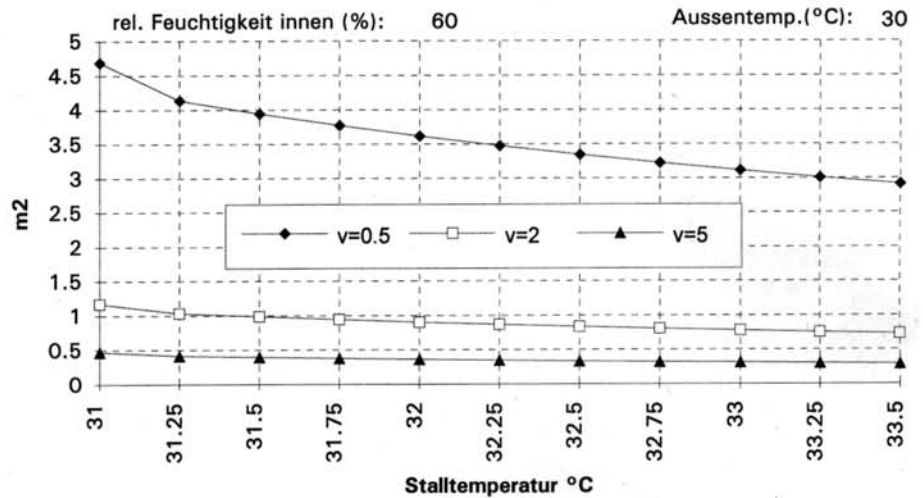


Abb. 16

Energie-Bilanz mit und ohne Wärmetauscher (WT)

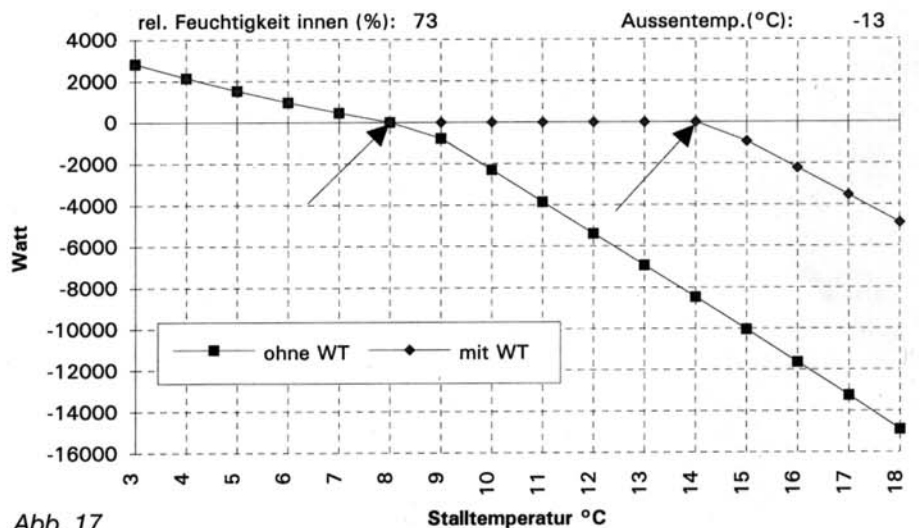


Abb. 17

Fläche Wärmetauscher

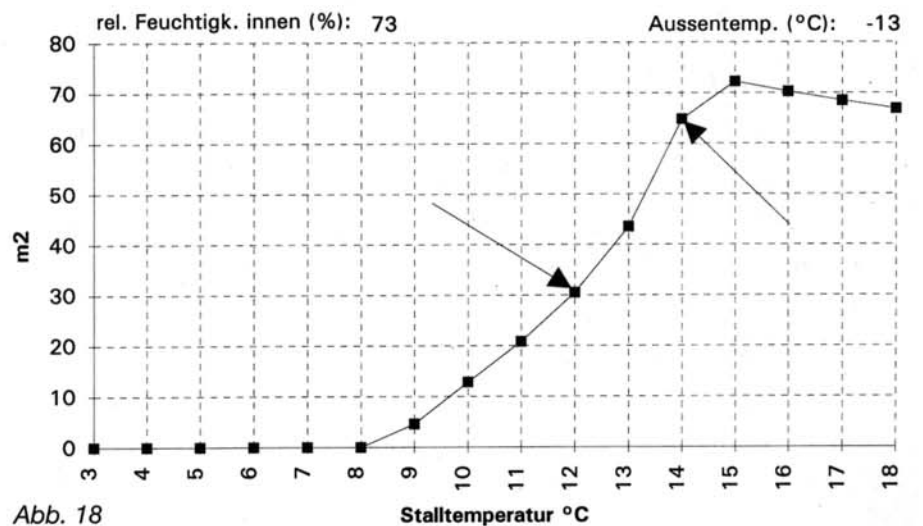


Abb. 18

Umluft-Wärmepumpe: Kühl- und Heizleistung im Stall, Nutz- und Motorleistung

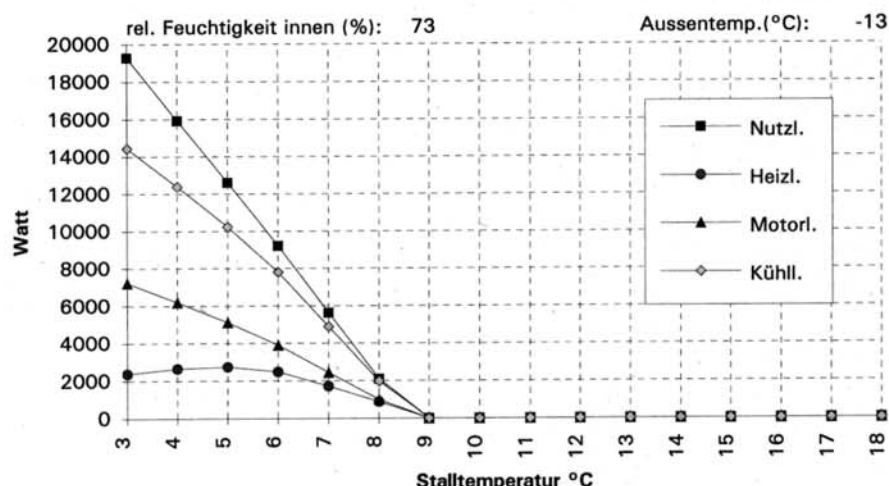


Abb. 19. Beim Einsatz der Umluftwärmepumpe muss sichergestellt werden, dass die relative Feuchtigkeit nicht ansteigt. Aus diesem Grund kann es nötig sein, die Luft nach Abkühlung wieder zu heizen.

Fortluftwärmepumpe: Kühl- und Heizleistung im Stall, Nutz- und Motorleistung

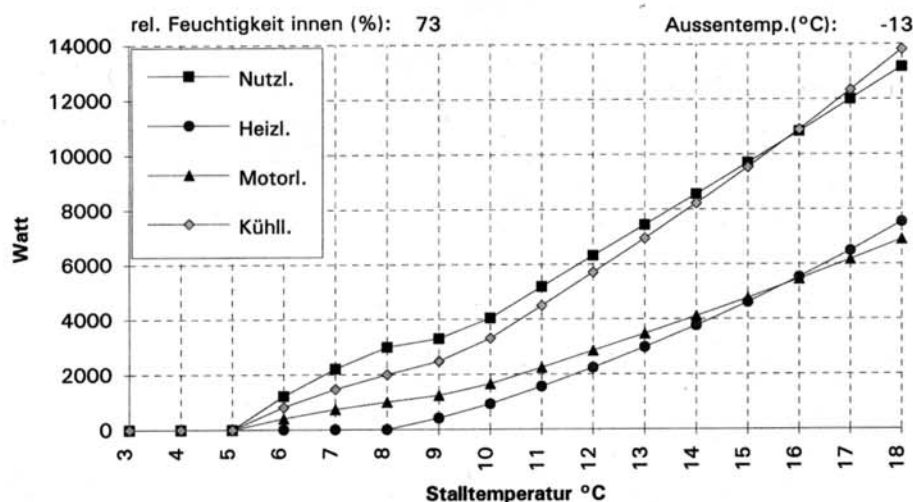


Abb. 20. Bei der Fortluftwärmepumpe ist es energetisch nicht sinnvoll, einen Teil der Nutzwärme für die Heizung der Stallluft abzuzweigen.

Wintersituation mit Wärmepumpe

Die Wärmepumpe lässt sich mit Umluft (Abb. 19) oder mit Fortluft (Abb. 20) betreiben. Der Einsatz der Umluft-Wärmepumpe beschränkt sich in der Regel auf die Stalltemperaturzone, welche einen Wärmeüberschuss aufweist. Man drosselt dabei im Gegensatz zur Fortluftwärmepumpe die Frischluftzufuhr auf die minimale Menge (nach CO₂-Bilanz). Damit die gewünschte relative Feuchtigkeit nicht überschritten wird, muss der Umluft durch Kühlung

(Kondensation) Wasserdampf entzogen werden. Wenn die Wärmepumpe hierbei mehr Überschusswärme als vorhanden entzieht, muss sie einen Teil ihrer Nutzwärme für die Heizung der Stallluft aufwenden.

Das Abzweigen eines Teils der Nutzleistung zur Erhöhung der Stalltemperatur ist für die Fortluftwärmepumpe meistens nicht sinnvoll. Die Steigung der Nutzleistung ist in der Regel kleiner als die Zunahme der Motorleistung (Abb. 20).

Schlussfolgerungen

Dank benutzerfreundlichen Masken ist es möglich, auf einfache Weise den komplexen Einfluss wichtiger Parameter wie Wärmedämmung, Belegungsdichte und Aussenklima auf das Stallklima zu untersuchen. Da alle Parameter temperaturabhängig definiert sind, kann das Stallklima sowohl für Warm- als auch Kaltställe angewendet werden.

Die Methode besteht darin, dass man auf grafische Weise mit Hilfe der Energiebilanzgleichung die Stalltemperatur bestimmt. Dabei werden die Temperatur und relative Feuchtigkeit aussen festgelegt. Durch das Variieren der relativen Feuchtigkeit innen (gegebenenfalls auch anderer Parameter wie Wärmedämmung) wird sichergestellt, dass die CO₂-Konzentration 3000 ppm nicht übersteigt und keine Kondenswasserbildung stattfindet. Aufgrund dieser Erkenntnisse werden ebenfalls grafisch die erforderlichen Lüftungsöffnungen und die Einsatzmöglichkeiten von Wärmetauscher und Wärmepumpe dargestellt.