

Hans-Jürgen Tantau

Wärmebedarf von Gewächshäusern unter Berücksichtigung des latenten Wärmetransportes

Im Unterschied zu Gebäuden wird der Wärmebedarf eines Gewächshauses auch durch die Evaporation der jeweiligen Kultur beeinflusst. Bei der Kondensation des Wasserdampfes am Bedachungsmaterial wird die latente Wärme wieder in sensible Wärme umgewandelt und durch das Bedachungsmaterial nach außen transportiert. Latente Wärme kann einen Anteil von über 50% am inneren Wärmeübergang erreichen und ist deshalb ein bedeutender Wärmestrom, der bei Wärmebedarfsrechnungen berücksichtigt werden muss. Die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte), wie sie in der Literatur angegeben werden, gelten nur für trockene Bedingungen ohne Kondensation. In der vorliegenden Arbeit wird ein vereinfachter methodischer Ansatz mit Wärmedurchgangs- und Wärmeübergangswiderständen beschrieben, mit dem der latente Wärmetransport berücksichtigt und U-Werte berechnet werden können, die für Gewächshausbedingungen mit Kondensation gelten.

Schlüsselwörter

Gewächshaus, Wärmebedarf, Wärmedurchgangskoeffizient, U-Wert, latente Wärme, Energiebilanz, Energieschirm, Verdunklung

Keywords

Greenhouse, heat demand, heat transfer coefficient, U-value, latent heat flux, energy balance, thermal screen, black out system

Abstract

Tantau, Hans-Juergen

Heat requirement of greenhouses including latent heat flux

Landtechnik 68(1), 2013, pp. 43–49, 1 figure, 5 tables, 9 references

Unlike buildings, the heat demand of greenhouses is affected also by the evaporation of the respective crop. Due to condensation of water vapour inside the covering material, latent heat is converted into sensible heat and transported outwards through the covering material. The

portion of latent heat can increase to more than 50% of the internal heat transfer and is therefore a significant heat flux, which must be considered in calculations of heat demand. The heat transfer coefficients (U-values), as they are given in literature, are only valid for dry conditions without condensation. In this work, a simplified methodological approach was chosen using heat transfer resistances to consider the latent heat flux and thus, to calculate U-values for greenhouse conditions including condensation.

■ Gewächshäuser ermöglichen aufgrund optimaler Klimabedingungen wesentlich höhere Erträge als im Freiland. Hinzu kommt eine Verlängerung der Kulturzeit durch die Produktion in den Wintermonaten. Allerdings erfordert die Erstellung einer Gewächshausanlage hohe Investitionskosten. Vor allem für die Beheizung und eventuell auch für die Belichtung entstehen hohe Energiekosten. Mit steigenden Preisen für Energie steigt der Anteil der Energiekosten an den Produktionskosten. Um die Wirtschaftlichkeit einer Kultur oder Kulturfolge zu überprüfen, werden Programme benötigt, die mit möglichst geringem Aufwand den Energiebedarf einer Gewächshauskultur ermitteln. Es gibt eine Vielzahl von Modellen, mit denen der Energieverbrauch berechnet werden kann. In der Regel gilt: Je komplexer ein Modell ist, desto mehr Eingangsparameter sind erforderlich. Wenn diese Parameter im Einzelfall nur grob geschätzt werden können oder wenn mit Default-Werten

Tab. 1

Verzeichnis der Formelzeichen

Table 1: List of abbreviations

Symbol Symbol	Beschreibung Description	Dimension Dimension
A	Fläche Area	m ²
c	Wärmekapazität Heat capacity	J kg ⁻¹ K ⁻¹
co	Kondensatmenge Quantity of condensation	g m ⁻² h ⁻¹
h	Wärmeübergangskoeffizient Heat transfer coefficient	W m ⁻² K ⁻¹
he	Enthalpie der Luft Enthalpy of the air	kJ kg ⁻¹
R	Wärmewiderstand Resistance of heat transfer	m ² K W ⁻¹
r0	Verdampfungswärme Enthalpy of evaporation of water	J kg ⁻¹
sol	Solarstrahlung Solar radiation	W m ⁻²
U	Wärmedurchgangskoeffizient Heat transfer coefficient	W m ⁻² K ⁻¹
V	Volumen Volume (of air)	m ³
x	Wassergehalt der Luft Water content of the air	kg kg ⁻¹
z	Luftwechsellzahl Air exchange rate	h ⁻¹
η	Faktor für die Umwandlung von Solarstrahlung in sensible Wärme Portion of solar radiation converted to sensible heat	-
θ	Temperatur Temperature	°C
ρ	Dichte Density	kg m ⁻³
τ	Durchlässigkeit Transmittance	-
Φ	Wärmestrom Energy flux	W

gerechnet wird, dann ist mit einem komplexeren Modell keine höhere Genauigkeit zu erwarten. Deshalb muss für diese Aufgabenstellung ein Kompromiss gefunden werden, der eine ausreichende Genauigkeit ermöglicht und mit möglichst wenigen Parametern auskommt. Ein solcher Modellansatz steckt beispielsweise im Hortex-Programm [1].

Die Basisgleichung für den Wärmebedarf Φ eines Gewächshauses lautet [1]:

$$\Phi = U_{cs} \times A_s \times (\theta_i - \theta_e) - sol \times A_g \times \tau \times \eta \quad [W] \quad (Gl. 1)$$

Der Wärmebedarfskoeffizient U_{cs} beinhaltet verschiedene Einflussgrößen auf den Wärmebedarf wie Bedachungsma-

terial, Windgeschwindigkeit, Bewölkung, Heizungssystem und die Evapotranspiration der jeweiligen Kultur mit dem sich daraus ergebenden latenten Wärmestrom. Der zweite Teil von Gleichung 1 beschreibt den solaren Energiegewinn des Gewächshauses am Tage. Darin ist τ die Durchlässigkeit der Gewächshausbedachung für die Globalstrahlung und η ein Faktor, der angibt, welcher Anteil der Globalstrahlung in sensible Wärme umgewandelt wird. Dieser Faktor kann zwischen ca. 1,0 für ein trockenes Gewächshaus ohne Pflanzen und nahe 0,0 liegen, z. B. für ein Gewächshaus mit Tomaten- oder Gurkenbestand. Zur Berechnung des Wärmebedarfs mit Gleichung 1 werden nur wenige Parameter benötigt. Diese Parameter müssen für den jeweiligen Anwendungsfall ermittelt werden (**Tabelle 1** und **2**).

Der Wärmebedarfskoeffizient U_{cs} setzt sich aus dem Wärmedurchgangskoeffizienten U und einem Koeffizienten für Luftwechsel U_L zusammen:

$$U_{cs} = U + U_L \quad [W m^{-2} K^{-1}] \quad (Gl. 2)$$

Der Wärmestrom mittels Luftaustausch durch Undichtigkeiten lässt sich mit folgender Gleichung berechnen:

$$\Phi_L = z \times V_g \rho_a (c_{pa} (\theta_i - \theta_e) + r_0 (x_i - x_e)) \quad [W] \quad (Gl. 3)$$

oder mit der Enthalpie he der Luft:

$$\Phi_L = z \times V_g \times \rho_a \times (he_i - he_e) \quad [W] \quad (Gl. 4)$$

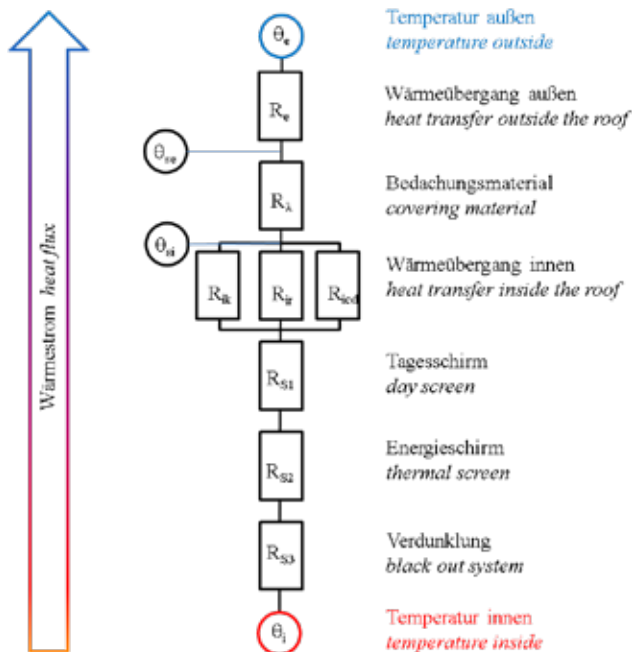
Der Wärmedurchgangskoeffizient für Luftwechsel U_L ergibt dann:

$$U_L = \Phi_L \times A_s^{-1} \times (\theta_i - \theta_e)^{-1} \quad [W m^{-2} K^{-1}] \quad (Gl. 5)$$

Die Ermittlung des Luftaustausches durch Undichtigkeiten am Gewächshaus wäre mit einem Tracer-Gas möglich, allerdings ist der Aufwand relativ groß. Bei der Planung neuer Gewächshäuser ist nur eine grobe Abschätzung möglich. Moderne Gewächshäuser sind relativ dicht, sodass Fehler bei der Abschätzung kaum ins Gewicht fallen. Von größerer Bedeutung ist in der Regel der Wärmedurchgang durch das Bedachungsmaterial und damit der Wärmedurchgangskoeffizient U . Für Bedachungsmaterialien liegen meist nur U -Werte aus Labormessungen vor [2]. Für die Berechnung des Wärmedurchgangs von Gewächshausbedachungen sind diese Werte nur bedingt brauchbar. Ein wichtiger Unterschied zu Labormessungen ist der latente Wärmetransport durch die Evapotranspiration der Kultur und die Kondensation am Bedachungsmaterial. Die latente Wärmeübertragung Φ_{icd} erfolgt innen am Bedachungsmaterial parallel zur Wärmeübertragung durch Konvektion Φ_{icv} und langwellige Wärmestrahlung Φ_{ir} :

$$\Phi_i = \Phi_{icv} + \Phi_{ir} + \Phi_{icd} \quad [W] \quad (Gl. 6)$$

Abb. 1



Widerstandsmodell für den Wärmestrom durch das Bedachungsmaterial von innen nach außen
 Fig. 1: Model of heat resistors for heat transfer through the covering material from inside to outside

Für diese Wärmeströme können folgende Wärmeübergangskoeffizienten ermittelt werden:

$$h_i = h_{icv} + h_{ir} + h_{icd} \quad [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}] \quad (\text{Gl. 7})$$

Der konvektive Wärmeübergang ist abhängig von den Strömungsbedingungen am Bedachungsmaterial (laminar oder turbulent), vom Heizungssystem (Luft- oder Rohrheizung) und bei freier Konvektion auch von der Gewächshaushöhe und der Temperaturdifferenz zwischen der Luft- und der Dachtemperatur. Der Wärmestrom durch langwellige Wärmestrahlung ist abhängig vom Heizungssystem und von der Temperaturdifferenz der im Strahlungsaustausch stehenden Flächen. Der konvektive Wärmestrom und der Strahlungswärmestrom lassen sich relativ genau berechnen [3; 4]. Der latente Wärmestrom Φ_{icd} bzw. der Wärmeübergangskoeffizient h_{icd} sind schwieriger zu ermitteln, da die Transpiration der Kultur in Abhängigkeit vom Blattflächenindex (LAI) und der Öffnung der Stomata sehr unterschiedlich sein kann. Das führt auch zu Problemen bei der Verwendung von Wärmeverbrauchskoeffizienten (U_{cs}) aus Wärmeverbrauchsmessungen in Gewächshäusern. In der Regel wird nicht spezifiziert, wie groß der latente Wärmestrom während der Messungen war. Oft fehlen auch Angaben zur Kultur. Aus diesen Gründen ist eine Übertragung gemessener U_{cs} -Werte auf andere Gewächshäuser mit anderen Kulturen schwierig und kann zu größeren Fehlern führen.

Tab. 2

Verzeichnis der Indizes
 Table 2: List of indices

Indizes/Indices	Beschreibung/Description
a	Luft/Air
cd	Kondensation/Condensation
cs	Verbrauch/Consumption
cv	Konvektion/Convection
e	Außen, extern/External
g	Gewächshaus/Greenhouse
i	Innen/Inside
L	Undichtigkeit/Leakage
p	Druck/Pressure
r	Strahlung/Radiation
s	Oberfläche/Surface
S	Schirm/Screen
λ	Leitung/Conduction

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur vereinfachten Abschätzung und Berücksichtigung des latenten Wärmestroms in beheizten Gewächshäusern. Ausgehend von Wärmedurchgangskoeffizienten aus Literaturangaben (Labormessungen) sollen U-Werte für unterschiedlichste Bedachungsmaterialien und gewächshauspezifische Bedingungen unter Berücksichtigung der Kondensation ermittelt werden.

Methoden

Als methodischer Ansatz wird zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten ein Widerstandsmodell verwendet (**Abbildung 1**). Ein solcher Ansatz findet sich bereits in der DIN-Norm 4701 [5; 6], aktuell ist die DIN EN 12831 [8] zur Berechnung des Auslegungs-Wärmebedarfes von Gewächshäusern heranzuziehen. Damit lässt sich auch der Wärmedurchgang komplexerer Bedachungssysteme berechnen. Die Widerstände lassen sich aus den Kehrwerten der Wärmeübergangs- und Wärmedurchgangskoeffizienten errechnen. Bei einer Hintereinanderschaltung von Widerständen ergibt sich der U-Wert aus dem Kehrwert der Summe der Einzelwiderstände:

$$U = (R_i + R_\lambda + R_e)^{-1} \quad [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}] \quad (\text{Gl. 8})$$

Ausgehend von U-Werten aus Labormessungen [2] wird für die verschiedenen Materialien ein Wärmedurchlasswiderstand R_λ berechnet:

$$R_\lambda = U^{-1} - R_i - R_e \quad [\text{m}^2 \text{K W}^{-1}] \quad (\text{Gl. 9})$$

Für die Berechnungen wurden innen und außen am Bedachungsmaterial als Wärmeübergangskoeffizienten $h_i = 9$ bzw. $h_e = 25 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ sowie die Widerstände $R_i = 0,111$ bzw.

Tab. 3

Wärmedurchlasswiderstände R_{λ} von Energieschirmen [8]
 Table 3: Heat resistance R_{λ} of screens [8]

Schirm/Screen	R_{λ} ($\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$)
Tagesschirm/Day screen	0,08
Energieschirm/Thermal screen	0,14
Verdunklung/Black out system	0,36

$R_e = 0,04 \text{ m}^2 \text{K W}^{-1}$ angenommen. Damit lassen sich die materialspezifischen Widerstände R_{λ} berechnen (Tabelle 4). Der negative Wärmedurchlasswiderstand R_{λ} für PE-Folie ist auf die Durchlässigkeit der Folie für langwellige Wärmestrahlung zurückzuführen.

Im nächsten Schritt können die für das Gewächshaus spezifischen Wärmeübergangskoeffizienten ermittelt werden. Der Wärmeübergangskoeffizient außen h_e ist von der Windgeschwindigkeit (erzwungene Strömung) und von der Abstrahlung an den Himmel bzw. von der Bewölkung abhängig. Für Einfachbedachungen lässt sich eine Abhängigkeit des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten von der Windgeschwindigkeit ermitteln [3]. Bei Doppel- oder Mehrfachbedachungen kann bei klarem Himmel der langwellige Strahlungswärmestrom außen an der Bedachung größer werden als der Wärmestrom von innen nach außen. Die Dachaußentemperatur sinkt dann unter die Lufttemperatur außen und dem Dach wird konvektiv Wärme zugeführt. In solchen Fällen macht die Angabe eines Wärmeübergangskoeffizienten h_e wenig Sinn, da die Werte sogar negativ werden können. Diese Probleme sind meist zu vernachlässigen, da bei Mehrfachbedachungen der äußere Wärmeübergangswiderstand R_e im Vergleich zum Wärmedurchlasswiderstand R_{λ} sehr klein wird.

Wichtig für Aufgabenstellung ist der innere Wärmeübergangswiderstand R_i . Wärme wird innen am Bedachungsmaterial durch parallele Wärmeströme übertragen (Gleichung 6). Die Wärmeübertragung durch Kondensation (latente Wärme) ist ein weiterer Wärmestrom. Die Wärmeübergangskoeffizienten werden nach Gleichung 7 addiert. Je nach dem Anteil latenter Wärme am Wärmeübergang ergeben sich entsprechende Wärmeübergangskoeffizienten h_i . Im Folgenden wird mit Werten von $h_i = 12$ bzw. $h_i = 15 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ gerechnet. Das entspricht einem Anteil latenter Wärme am inneren Wärmeübergang von 25 bzw. 40%. In dieser Größenordnung liegen die Werte für Topfpflanzenkulturen [8]. Für Gemüsekulturen mit großer Blattfläche, z.B. bei Tomaten und Gurken, ist mit einem höheren Anteil latenter Wärme zu rechnen (ca. 50–60%).

Ergebnisse

Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte)

In Tabelle 4 sind die berechneten U-Werte für verschiedene Materialien angegeben. Man erkennt, dass die Differenzen der U-Werte zwischen trocken ($h_i = 9$) und feucht ($h_i = 12$ bzw. $h_i = 15 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) mit höherer Wärmedämmung geringer wer-

den. Beim Einsatz von Energieschirmen erzeugt jeder Energieschirm einen zusätzlichen Widerstand R_s (Tabelle 3), der zum Wärmedurchgangswiderstand addiert wird:

$$U = (R_i + R_{\lambda} + R_e + R_{S1} + R_{S2} + R_{S3})^{-1} [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}] \quad (\text{Gl. 10})$$

Die Werte in Tabelle 4 gelten für die getroffenen Annahmen im Hinblick auf die Wärmeübergangskoeffizienten innen und außen. Mit dem beschriebenen Ansatz lassen sich auch für andere Betriebsbedingungen, z.B. für ein anderes Heizungssystem, U-Werte ermitteln.

Dachinnenflächentemperaturen

Für das Kondensationsverhalten und für die Abschätzung der Kondensatmenge ist die Dachinnenflächentemperatur θ_{si} wichtig:

$$\theta_{si} = (R_{\lambda} + R_e) \times U \times (\theta_i - \theta_e) + \theta_e \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{Gl. 11})$$

Nimmt man für den Auslegungsfall $\theta_i = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $\theta_e = -14 \text{ }^{\circ}\text{C}$ an, dann erhält man:

$$\theta_{si} = (R_{\lambda} + 0,04) \times U \times 34,0 - 14,0 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{Gl. 12})$$

und für höhere Außentemperaturen von z.B. $\theta_e = 5,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\theta_{si} = (R_{\lambda} + R_e) \times U \times 15,0 + 5,0 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{Gl. 13})$$

Die berechneten Oberflächentemperaturen sind in Tabelle 5 angegeben. Mit höherer Wärmedämmung, d.h. bei kleineren U-Werten, steigen die Dachinnenflächentemperaturen.

Kondensatmengen

Die Kondensatmengen c_o können aus dem Anteil latenter Wärme mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$c_o = h_{icd} \times (\theta_i - \theta_{si}) / r_0 \times 3600 \quad [\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}] \quad (\text{Gl. 14})$$

Für Energieschirme wird vereinfachend angenommen, dass die Kondensation nur am Bedachungsmaterial und nicht am Energieschirm auftritt. Bei Wärmeübergangskoeffizienten von $h_i = 12$ und $h_i = 15 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ beträgt der Wärmeübergangskoeffizient für Kondensation $h_{icd} = 3,0$ bzw. $h_{icd} = 6,0 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$. Die berechneten Kondensatmengen sind in Tabelle 5 für Auslegungsbedingungen $\theta_i = 20$ und $\theta_e = -14 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und für „normale“ Betriebsbedingungen mit $\theta_i = 20$ und $\theta_e = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ angegeben. Die Kondensatmenge hängt entscheidend von der Dachinnenflächentemperatur ab. Mit steigender Dachinnenflächentemperatur bei besserer Wärmedämmung und kleineren U-Werten oder steigenden Außentemperaturen wird die Kondensatmenge unter sonst gleichen Bedingungen deutlich kleiner. Das bedeutet, dass die Gewächshausluft weniger entfeuchtet wird und sich somit die Luftfeuchte erhöht. Gleichzeitig können die Pflanzen bei höherer Luftfeuchte we-

Tab. 4

Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) für ein trockenes Gewächshaus ($h_i = 9 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$) [2] und zwei Varianten mit Kondensation am Bedachungsmaterial ($h_i = 12$ und $h_i = 15 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$); ($h_e = 25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)

Table 4: Heat transfer coefficients (U-values) for a dry greenhouse ($h_i = 9 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$) [2] and two versions with condensation ($h_i = 12$ and $h_i = 15 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$); ($h_e = 25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)

Re = 0,04 m² K W⁻¹		h_i = 9 W m⁻² K⁻¹	h_i = 12 W m⁻² K⁻¹	h_i = 15 W m⁻² K⁻¹
R_i	m² K W⁻¹	0,11111	0,083333	0,066667
	U-Wert/U-value	R_s/R_λ	U-Wert/U-value	U-Wert/U-value
Folien/Film material	W m⁻² K⁻¹	m² K W⁻¹	W m⁻² K⁻¹	W m⁻² K⁻¹
PE-Folie UV-stabilisiert, einfach <i>PE, UV-stabilized, single</i>	7,0	-0,01	8,7	10,1
PE-Folie UV-stabilisiert, doppelt <i>PE, UV-stabilized, double</i>	3,4	0,14	3,8	4,0
EVA-Folie, koextrudiert, einfach <i>EVA, coextruded, single</i>	6,2	0,01	7,5	8,5
PVC-Folie, einfach <i>PVC, single</i>	6,1	0,01	7,3	8,4
PE-Luftpolsterfolie <i>PE „Bubble Wrap“</i>	5,4	0,03	6,3	7,1
ETFE-Folie, "no drop", einfach <i>ETFE-film, no drop, single</i>	6	0,02	7,2	8,2
ETFE-Folie, "no drop", doppelt <i>ETFE-film, no drop, double</i>	3	0,18	3,3	3,5
Starre Materialien/Rigid material	U-Wert/U-value	R_s/R_λ	U-Wert/U-value	U-Wert/U-value
Floatglas, einfach <i>Float glass, single layer</i>	6	0,02	7,2	8,2
Floatglas, Isolierglas <i>Float glass, double layer</i>	3	0,18	3,3	3,5
PMMA-Stegdoppelplatte, 16 mm, Alltop <i>PMMA „Alltop“ 16 mm</i>	2,5	0,25	2,7	2,8
PMMA-Stegvierfachplatte, 32 mm <i>PMMA 32 mm, fourfold</i>	1,6	0,47	1,7	1,7
PVC- oder glasfaserverstärkte Platten <i>PVC or fibre glass corrugated</i>	6,8	0,00	8,4	9,7
Polycarbonat-Stegdoppelplatten 6 mm <i>PC 6 mm double</i>	3,6	0,13	4,0	4,3
Polycarbonat-Stegdoppelplatten 10 mm <i>PC 10 mm double</i>	3,2	0,16	3,5	3,7
Polycarbonatplatten, 16 mm, X-Struktur <i>PC 16 mm, x-structure</i>	1,8	0,40	1,9	2,0
Polycarbonat-Fünffachplatten 32 mm <i>PC 32 mm fivefold</i>	1,4	0,56	1,5	1,5
Materialkombinationen/Combinations	U-Wert/U-value	R_s/R_λ	U-Wert/U-value	U-Wert/U-value
GFC (eisenarmes Glas + ETFE-Folie) <i>GFC (low iron AR glass + ETFE-film)</i>	3,1	0,17	3,4	3,6
FGFC (ETFE-Folie + Glass + ETFE) <i>FGFC (ETFE-film + glass + ETFE-film)</i>	1,8	0,40	1,9	2,0
Einfachglas + Tagesschirm <i>Single glass + day screen</i>	3,98	0,08	4,48	4,84
Einfachglas + Tages- + Energieschirm <i>Single glass + day + thermal screen</i>	2,56	0,22	2,75	2,88
Einfachglas + 2 Schirme + Verdunklung <i>Single glass + 2 screens + black out</i>	1,33	0,58	1,38	1,42
Isolierglas + Tagesschirm <i>Double glass + day screen</i>	2,43	0,08	2,61	2,73
Isolierglas + Tages- + Energieschirm <i>Double glass + day + thermal screen</i>	1,81	0,22	1,91	1,97
Isolierglas + 2 Schirme + Verdunklung <i>Double glass + 2 screens + black out</i>	1,10	0,58	1,13	1,15

Tab. 5

Dachinnenflächentemperaturen und Kondensatmenge für Wärmeübergangskoeffizienten innen von $h_i = 9, h_i = 12, h_i = 15 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$; $h_e = 25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$; $\theta_i = 20 \text{ °C}$

Table 5: Temperature inside the cover and amount of condensation at heat transfer coefficients inside of $h_i = 9, h_i = 12, h_i = 15 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$; $h_e = 25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$; $\theta_i = 20 \text{ °C}$

$h_e = 25 \text{ W(m}^2 \text{ K)}$ $R_e = 0,04 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$	Dachinnenflächentemperatur Temperature inside the cover			Kondensatmenge Amount of condensation			
	$h_i = 9$	$h_i = 12$	$h_i = 15$	$h_i = 12$	$h_i = 15$	$h_i = 12$	$h_i = 15$
	θ_{si}	θ_{si}	θ_{si}	$\theta_e = -14 \text{ °C}$		$\theta_e = 5 \text{ °C}$	
Folien/Film material	°C	°C	°C	$\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	$\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	$\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	$\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$
PE-Folie UV-stabilisiert, einfach <i>PE, UV-stabilized, single</i>	-6,4	-4,6	-3,0	118	220	52	97
PE-Folie UV-stabilisiert, doppelt <i>PE, UV-stabilized, double</i>	7,2	9,4	10,9	51	87	22	38
EVA-Folie, koextrudiert, einfach <i>EVA, coextruded, single</i>	-3,4	-1,2	0,6	101	185	45	82
PVC-Folie, einfach <i>PVC, single</i>	-3,0	-0,8	1,0	99	181	44	80
PE-Luftpolsterfolie <i>PE „Bubble Wrap“</i>	-0,4	2,0	3,9	86	154	38	68
ETFE-Folie, "no drop", einfach <i>ETFE-film, no drop, single</i>	-2,6	-0,4	1,5	98	177	43	78
ETFE-Folie, "no drop", doppelt <i>ETFE-film, no drop, double</i>	8,7	10,7	12,2	44	75	20	33
Starre Materialien/Rigid material	°C	°C	°C	$\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	$\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	$\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	$\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$
Floatglas, einfach <i>Float glass, single layer</i>	-2,6	-0,4	1,5	98	177	43	78
Floatglas, Isolierglas <i>Float glass, double layer</i>	8,7	10,7	12,2	44	75	20	33
PMMA-Stegdoppelplatte, 16 mm, Alltop <i>PMMA „Alltop“ 16 mm, double</i>	10,6	12,4	13,6	36	61	16	27
PMMA-Stegvierfachplatte, 32 mm <i>PMMA 32 mm, fourfold</i>	14,0	15,3	16,1	23	37	10	16
PVC- oder glasfaserverstärkte Platten <i>PVC or fibre glass corrugated</i>	-5,7	-3,7	-2,1	114	211	50	93
Polycarbonat-Stegdoppelplatten 6 mm <i>PC 6 mm double</i>	6,4	8,7	10,3	54	93	24	41
Polycarbonat-Stegdoppelplatten 10 mm <i>PC 10 mm double</i>	7,9	10,1	11,5	48	81	21	36
Polycarbonatplatten, 16 mm, X-Struktur <i>PC 16 mm, x-structure</i>	13,2	14,6	15,6	26	42	11	19
Polycarbonat-Fünffachplatten 32 mm <i>PC 32 mm fivefold</i>	14,7	15,9	16,6	20	32	9	14
Materialkombinationen/combinations	°C	°C	°C	$\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	$\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	$\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	$\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$
GFC (eisenarmes Glas + ETFE-Folie) <i>GFC (low iron AR glass + ETFE-film)</i>	8,3	10,4	11,9	46	78	20	34
FGFC (ETFE-Folie + Glas + ETFE) <i>FGFC (ETFE-film + glass + ETFE)</i>	13,2	14,6	15,6	26	42	11	19
Einfachglas + Tagesschirm <i>Single glass + day screen</i>	-5,9	-4,9	-4,1	61	105	27	46
Einfachglas + Tages- + Energieschirm <i>Single glass + day + thermal screen</i>	-8,8	-8,4	-8,1	37	63	16	28
Einfachglas + 2 Schirme + Verdunklung <i>Single glass + 2 screens + black out</i>	-11,3	-11,2	-11,1	19	31	8	14
Isolierglas + Tagesschirm <i>Double glass + day screen</i>	4,2	5,5	6,4	35	59	16	26
Isolierglas + Tages- + Energieschirm <i>Double glass + day + thermal screen</i>	-0,4	0,3	0,8	26	43	11	19
Isolierglas + 2 Schirme + Verdunklung <i>Double glass + 2 screens + black out</i>	-5,8	-5,5	-5,4	15	25	7	11

niger Wasser verdunsten. Die verringerte Verdunstung kann die Aufnahme von Nährsalzen wie z. B. Ca begrenzen und zu Mangelsymptomen führen. Eine hohe Luftfeuchte erhöht auch das Risiko von Pilzinfektionen.

Schlussfolgerungen

Mit dem beschriebenen methodischen Ansatz lässt sich der Wärmedurchgangskoeffizient relativ genau berechnen. Ein Vergleich mit den Ergebnissen von Wärmeverbrauchsmessungen aus anderen Untersuchungen zeigt eine gute Übereinstimmung der berechneten U-Werte [8]. Damit ist die Zielsetzung dieser Arbeit erreicht.

Bei Doppel- oder Mehrfachbedachungen sind die Fehler dieses Ansatzes kleiner als bei Einfachbedachungen. Das lässt sich mit dem Widerstandsmodell erklären. Bei Einfachbedachungen ist der Wärmedurchlasswiderstand sehr klein ($R_{\lambda} \approx 0,0 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$). Der innere und der äußere Wärmeübergangswiderstand bestimmen den Gesamtwiderstand und damit den U-Wert. Da diese Widerstände von verschiedenen Einflussgrößen abhängig sind, ergibt sich eine relativ große Spanne für den U-Wert von Einfachbedachungen. Bei Doppel- und Mehrfachbedachungen bestimmt der Wärmedurchlasswiderstand als größter Widerstand maßgeblich den U-Wert. Änderungen der Wärmeübergangskoeffizienten wirken sich nur gering aus.

Die Temperatur der Dachinnenflächen ist entscheidend für die Kondensationsbedingungen. Bei besserer Wärmedämmung und kleineren U-Werten und bei höheren Außentemperaturen steigt die Dachinnenflächentemperatur. Damit stehen die Blätter mit einer wärmeren Fläche im Strahlungsaustausch. Es wird von den Blättern weniger langwellige Wärmestrahlung an das Dach abgegeben. Die Blatttemperatur kann sich dadurch erhöhen. Wichtiger ist sicherlich der Einfluss der Dachinnenflächentemperatur auf die Kondensatmenge. Bei einer Doppel- oder Dreifachbedachung ist Kondensation erst bei höherer Luftfeuchte möglich. Im Vergleich zur Einfachbedachung sind die Kondensatmengen deutlich reduziert.

Interessant ist auch die Wirkung von Schirmsystemen auf die Luftfeuchte. Einerseits behindern Schirmmaterialien den Transport des Wasserdampfes an das Bedachungsmaterial. Andererseits sinkt die Dachinnenflächentemperatur bei geschlossenen Schirmen, sodass eine größere Differenz zwischen dem Wassergehalt der Luft im Pflanzenbereich und dem Sättigungswassergehalt am Bedachungsmaterial entsteht. Im vorgestellten Ansatz wird eine spezifische Durchlässigkeit der Energieschirmmaterialien für Wasserdampf nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass Wärme und Wasserdampf vom Schirmmaterial in analoger Weise durchgelassen werden.

Bei allen Maßnahmen zur Einsparung von Heizenergie ist in der Regel mit einer erhöhten Luftfeuchte zu rechnen. In dem beschriebenen Ansatz ist nicht berücksichtigt, dass für eine Entfeuchtung eventuell zusätzlich Energie aufgewendet werden muss. Negative Auswirkungen der höheren Luftfeuchte lassen sich durch mehrere Maßnahmen mindern. So ist die Wahl des Bewässerungssystems von Bedeutung. Nach dem Bewässerungsvorgang sollten möglichst keine feuchten Flächen bleiben, die zusätzlich Wasser verdunsten. Wichtig ist auch ein ausreichender Pflanzen- oder Topfabstand. Bei geschlossenem Pflanzenbestand stellt sich im Pflanzenbestand eine höhere Luftfeuchte ein [9], wodurch Pilzinfektionen begünstigt werden. Größere Temperaturgradienten bedeuten auch immer Feuchtegradienten. In Bereichen mit niedrigeren Temperaturen stellt sich eine höhere Luftfeuchte ein kann zur Kondensation (Niederschlag) auf den Blättern oder Früchten führen. Durch die Wahl und richtige Anordnung des Heizungssystems lässt sich in Verbindung mit Ventilatoren eine sehr gleichmäßige Temperatur- und Feuchteverteilung erreichen, sodass auch höhere Luftfeuchten bis zu 90 % r.F. keine negativen Auswirkungen haben.

Die Wahl und richtige Anordnung des Heizungssystems lässt sich in Verbindung mit Ventilatoren eine sehr gleichmäßige Temperatur- und Feuchteverteilung erreichen, sodass auch höhere Luftfeuchten bis zu 90 % r.F. keine negativen Auswirkungen haben.

Literatur

- [1] Rath, T. (1992): Einsatz wissenschaftlicher Systeme zur Modellierung und Darstellung von gartenbautechnischem Fachwissen am Beispiel des hybriden Expertensystems HORTEX. Gartenbautechnische Informationen, Heft 34, Eigenverlag des Instituts für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft
- [2] Max, J. F. J.; Schurr, U.; Tantau, H.-J.; Mutwiwa, U. N.; Hofmann, T.; Ulbrich, A. (2012): Greenhouse Cover Technology. Horticultural Reviews 40, First Edition. Ed. Jules Janick, pp. 259–396
- [3] Tantau, H.-J. (1975): Der Einfluss von Einfach- und Doppelbedachungen auf das Klima und den Wärmehaushalt von Gewächshäusern. Gartenbautechnische Informationen Heft 4, Institut für Technik in Gartenbau u. Landwirtschaft, Universität Hannover
- [4] Tantau, H.-J. (1977): The Influence of Single and Double Shelters on the Climate and Heat Consumption of Greenhouses. Acta Hort. (ISHS) 70, pp. 11–15
- [5] Tantau, H.-J. (1974): Wärmeverbrauchsmessungen an Gewächshäusern als Grundlage der Wärmebedarfsrechnung. HLH Heizung Lüftung/Klima Haustechnik 25(9), S. 289–293
- [6] DIN 4701 (1983): Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen
- [7] DIN EN 12831 (2003): Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast
- [8] Tantau, H.-J. (2012): Das Niedrigenergiegewächshaus – Methode zur Analyse der Wärmeströme und der PAR-Durchlässigkeit. Landtechnik 67(3), S. 196–204
- [9] Lange, D.; Tantau, H.-J. (1996): Climate Management for Disease Control Investigations on Control Strategies, Plant Densities and Irrigation Systems. Acta Hort. (ISHS) 406, pp. 105–114

Autor

Prof. Dr. Hans-Jürgen Tantau war bis 30.09.2010 geschäftsführender Leiter des Fachgebietes Biosystem- und Gartenbautechnik der Leibniz Universität Hannover. Seit Mai 2009 ist er Koordinator des ZINEG-Forschungsverbundvorhabens, E-Mail: tantau@bgt.uni-hannover.de

Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, der Landwirtschaftlichen Rentenbank, dem Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz sowie der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung für die Unterstützung.