

Hans-Jürgen Tantau

Das Niedrigenergiegewächshaus – Methode zur Analyse der Wärmeströme und der PAR-Durchlässigkeit

Um den Heizenergieverbrauch bei der Pflanzenproduktion in Gewächshäusern zu reduzieren wurden im Forschungsverbundvorhaben „Zukunftsinitiative Niedrigenergiegewächshaus“ ZINEG an vier verschiedenen Standorten unterschiedliche Konzepte für Niedrigenergie-gewächshäuser realisiert. In Hannover-Ahlem wird auf dem Gelände der Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau (LVG) ein Niedrigenergiegewächshaus untersucht, bei dem durch eine Isolierverglasung im Dach und drei Energieschirme ein überdurchschnittlich hoher Wärmedämmstandard erreicht wurde. Zur Beurteilung dieser Ansätze wurden Wärmeverbrauchs- und PAR-Durchlässigkeitsmessungen (photosynthetisch aktive Strahlung) durchgeführt. Im Vergleich zu einem einfachverglasten Gewächshaus beträgt die Energieeinsparung nachts bei geschlossenen Energieschirmen 84 %. Mit dem beschriebenen methodischen Ansatz kann der Wärmeübergang innen am Gewächshausdach näher analysiert werden und u. a. der Anteil latenter Wärme am Wärmeübergang und am Wärmeverbrauch ermittelt werden.

Schlüsselwörter

Niedrigenergiegewächshaus, Energieschirm, Verdunklung, Energiebilanz, PAR-Durchlässigkeit, diffuse Strahlung

Keywords

Low energy greenhouse, thermal screen, black out system, energy balance, PAR-transmittance, diffuse radiation

Abstract

Tantau, Hans-Juergen

Low energy greenhouse – method to analyse heat flux and PAR-transmittance

Landtechnik 67 (2012), no. 3, pp. 196–204, 8 figures, 5 tables, 4 references

The main task of the German joined research project “Future Initiative Low Energy Greenhouse”, ZINEG is to develop low energy greenhouses. Within this research project four concepts of low energy greenhouse have been developed. The experimental greenhouses have been built in Berlin, Hannover, Osnabrück and Neustadt/Weinstraße. In Hannover the experimental greenhouse is situated at the horticultural research station in Hannover-Ahlem (LVG). For energy sav-

ing the roof is covered with double glazing with AR-coating. Additionally three thermal screens are installed in order to get a maximum insulation. In order to evaluate this concept measurements of heat consumption and PAR-transmittance (photosynthetic active radiation) are carried out. In comparison with a single glazed greenhouse 84% of energy can be saved during night, when all screens are closed. With the method described in this paper the heat flux inside the roof can be analysed. Especially the portion of latent heat flux by condensation can be calculated. Furthermore the influence of evapotranspiration of the crop and the latent heat flux on the overall heat consumption can be determined.

■ Gewächshäuser dienen der meist ganzjährigen Produktion pflanzlicher Erzeugnisse. Je nach Kultur sind bestimmte Anforderungen an die Klimatisierung zu stellen. Aus energetischer Sicht sind besonders die Temperaturansprüche in den Wintermonaten von Bedeutung, da sich daraus der erforderliche Heizenergieaufwand ableitet. Außerdem ist für die Kultur in den Wintermonaten die Lichtdurchlässigkeit der Gewächshausbedachung von besonderer Bedeutung, da Licht oft als Minimumfaktor das Wachstum begrenzt. Aus diesem Grunde sind Gewächshäuser häufig einfachverglast, da eine Doppel- oder Dreifachverglasung die Lichtdurchlässigkeit vermindert. Die Verwendung einer Einfachverglasung führt in den Wintermo-

naten zu einem relativ hohen Energieverbrauch für die Beheizung der Gewächshäuser und folglich zu hohen Energiekosten. Da Gewächshäuser noch überwiegend mit fossilen Energieträgern wie Heizöl und Erdgas beheizt werden, sind angesichts der Endlichkeit dieser Ressourcen und zur Verminderung fossiler CO₂-Emissionen Maßnahmen erforderlich, um den Energieverbrauch der Gewächshäuser zu senken und möglichst CO₂-neutral zu produzieren. Vor diesem Hintergrund ist die Zukunftsinitiative Niedrigenergiegewächshaus (ZINEG) entstanden [1]. Das Verbundforschungsvorhaben zielt darauf ab, den Energieverbrauch der Gewächshäuser auf Niedrigenergieniveau zu senken. An den Standorten Berlin, Hannover, Neustadt an der Weinstraße und Osnabrück wurden unterschiedliche Konzepte eines Niedrigenergiegewächshauses entwickelt und als Versuchsgewächshäuser realisiert [1]. Diese Gewächshäuser werden zurzeit untersucht.

Im Folgenden soll das Konzept des Niedrigenergiegewächshauses in Hannover-Ahlem vorgestellt und die Ansätze zur Energieeinsparung aus energetischer und lichttechnischer Sicht analysiert werden.

Material und Methoden

Das Niedrigenergiegewächshaus in der Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau (LVG) Hannover-Ahlem hat eine Grundfläche von 960 m² (Länge: 40 m, Breite: 24 m) und ist in zwei Abteilungen unterteilt, die heizungs- und lüftungstechnisch getrennt geregelt werden. Zur Energieeinsparung ist das Gewächshaus mit Isolierglas (4-12-4 mm) eingedeckt und mit einem Tagesschirm, einem Energieschirm und einer Verdunklung ausgerüstet. Die Isolierverglasung besitzt eine Antireflexbeschichtung und weist somit eine höhere Lichtdurchlässigkeit auf als eine konventionelle Einfachverglasung mit Floatglas. Der Tagesschirm besteht aus einem leichten Gewebe mit ca. 20 % Schattierwirkung. Dieser Schirm kann bei sehr niedrigen Außentemperaturen und hohem Heizbedarf auch am Tage geschlossen bleiben. Der Energieschirm wird im Sommer als Schattierung eingesetzt. Deshalb wurde ein Material mit 50 % Schattierwirkung gewählt. Alle drei Systeme werden horizontal in Längsrichtung des Gewächshauses von Binder zu Binder geschlossen. Für die Verdunklung sind zusätzlich an den Stehwänden (i. e. Längswände), an den Giebeln und zum Mittelgang hin Rollschirme als Twinsystem installiert. Die Außenstehwände und die Giebel bestehen aus Stegvierfachplatten (Acrylglas PMMA, d = 32 mm); die Trennwand zwischen den beiden Abteilungen aus PMMA-Stegdoppelplatten (d = 16 mm, hochtransparent und UV-durchlässig). Da als alternative Energie Solarenergie genutzt wird, ist das Gewächshaus mit Gebläsekonvektoren als Niedertemperaturheizungssystem in der Nacht und als System zur Solarenergienutzung am Tage ausgestattet. In jeder Abteilung sind an der Außenstehwand acht Geräte installiert. Regelungstechnisch sind die Gebläsekonvektoren in zwei Gruppen unterteilt, sodass jeweils 4 Geräte eine Regeleinheit bilden. Die Luft wird nach oben ausgeblasen, sodass in Längsrichtung eine horizontale Luftwalze entsteht.

Wärmeverbrauch

Die Messung des spezifischen Wärmeverbrauches erfolgte jeweils nachts von 22 bis 5 Uhr unter möglichst konstanten Bedingungen, um Einflüsse durch Wärmespeichereffekte und Solarstrahlung auszuschließen.

Zur Messung der zugeführten Wärmemenge sind vor jeder Abteilung magnetisch induktive Durchflussmessgeräte (MID) von Krohne, Typ Optiflux 1000 C, DN 15 installiert. Die Wiederholbarkeit beträgt ±0,1 % vom Mittelwert, mindestens 1 mm/s, und die Langzeitstabilität ±0,1 % vom Mittelwert. Die Prozesstemperatur ist mit -25 bis +120 °C angegeben. Die Messung der Vor- und Rücklauftemperaturen erfolgt mit Thermoelementen (NiCr-Ni in Tauchhülsen), Messgenauigkeit ±0,1 K. Die Messung der Lufttemperatur und -feuchte erfolgt mit Sensirion SHT75, maximale Toleranz ±0,3 °C, ±1,8 % RH. Die Anordnung der Sensoren und die Durchführung der Wärmeverbrauchsmessungen erfolgten nach [2]. In 1 m Höhe (Pflanzenbestand) wurden fünf Sensoren pro Unterabteilung angeordnet. Ein weiterer Sensor wurde oberhalb der Schirme im Dachraum installiert und zwei Sensoren wurden außen in einer meteorologischen Hütte in 2 m Höhe angebracht. Zusätzlich wurden Thermolemente (NiCr-Ni) als Oberflächenfühler innen und außen an der Stehwand, am Giebel, am Isolierglasdach und an den Sprossen angebracht. Zwei weitere Thermolemente messen die Bodentemperatur an der Oberfläche und in 10 cm Tiefe. Die Messungen erfolgen alle 15 s. Die Messwerte werden auf einer Festplatte abgespeichert, anschließend in eine SQL-Datenbank übertragen und stehen damit für weitere Verrechnungen mit Excel 2010 zur Verfügung.

Wärmeverbrauchs-koeffizient

Zur Beurteilung des Wärmeverbrauches wird ein Wärmeverbrauchs-koeffizient U_{cs} berechnet:

$$U_{cs} = \Phi_{cs} / (A_s (\vartheta_i - \vartheta_e)) \quad [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}] \quad (\text{Gl. 1})$$

Dazu muss die zugeführte Wassermenge gemessen und die Wärmeleistung berechnet werden:

$$\Phi_{cs} = V_w \rho_w c_{pw} (\vartheta_{in} - \vartheta_{out}) \quad [\text{W}] \quad (\text{Gl. 2})$$

Für die Dichte und die spezifische Wärme von Wasser ($\rho_w c_{pw}$) wurde in Abhängigkeit der Wassertemperatur ϑ_w ein Polynom vierten Grades ermittelt:

$$\rho_w c_{pw} = 8,797E^{-10} \vartheta_w^4 - 2,0118E^{-7} \vartheta_w^3 + 1,4532 E^{-5} \vartheta_w^2 - 0,0008114 \vartheta_w + 1,1714 \quad [\text{Wh L}^{-1} \text{K}^{-1}] \quad (\text{Gl. 3})$$

Eine Schwierigkeit ergibt sich bei diesem Ansatz durch den Bezug auf unterschiedliche Materialien für Dach und Stehwände. Bei größeren Gewächshausanlagen (z.B. 1–2 ha) wird der Anteil der Stehwände und Giebel immer kleiner bzw. der Wärmedurchgang durch das Dach anteilig immer größer. Deshalb

ist es für die Anwendung der Berechnungen auf größere Gewächshauseinheiten wichtig, den Wärmeverbrauchscoeffizienten für das Dach zu ermitteln. Dazu müssen die Wärmeströme durch die Stehwände und Giebel berechnet und anschließend von der zugeführten Wärmeleistung abgezogen werden.

Für die Stehwände gilt:

$$\Phi_{sw} = \Lambda_{sw} A_{sw} (\vartheta_{swi} - \vartheta_{swe}) \quad [W] \quad (Gl. 4)$$

und für die Giebel:

$$\Phi_{ga} = \Lambda_{ga} A_{ga} (\vartheta_{gai} - \vartheta_{gae}) \quad [W] \quad (Gl. 5)$$

Dann ergibt sich der Wärmestrom Φ_{ro} durch das Dach:

$$\Phi_{ro} = \Phi_{cs} - \Phi_{sw} - \Phi_{ga} \quad [W] \quad (Gl. 6)$$

und der Wärmedurchgangskoeffizient U_{ro} für das Dach:

$$U_{ro} = \Phi_{ro} / (A_{ro} (\vartheta_i - \vartheta_e)) \quad [W m^{-2} K^{-1}] \quad (Gl. 7)$$

Für einen Schnelltest [3], mit dem ohne Wärmeverbrauchs-messungen in Praxisgewächshäusern die Wirkung von Energieschirmen ermittelt werden kann, wird ein Verhältniswert aus den Temperaturdifferenzen (P_{air} -Wert) berechnet:

$$P_{air} = (\vartheta_o - \vartheta_a) / (\vartheta_i - \vartheta_a) \quad [^\circ C] \quad (Gl. 8)$$

Analyse der Wärmeströme

Zur weitergehenden Analyse der Wärmeströme innen am Dach kann ein Wärmeübergangskoeffizient h_i berechnet werden:

$$h_i = \Phi_{ro} / (A_{ro} (\vartheta_i - \vartheta_{roi})) \quad [W m^{-2} K^{-1}] \quad (Gl. 9)$$

Am Dach innen wird Wärme durch Konvektion, langwellige Wärmestrahlung und Kondensation übertragen. Für den Wärmeverbrauch eines Gewächshauses ist die Kondensation am Eindeckungs-material und damit die latente Wärmeübertragung Φ_{cd} von besonderer Bedeutung.

$$\Phi_{cd} = h_{cv} / c_{pa} A_{ro} r_0 (x_a - x_{sat}) \quad [W] \quad (Gl. 10)$$

In Anlehnung an den konvektiven Wärmeübergang lässt sich ein scheinbarer Wärmeübergangskoeffizient h_{cd} für Kondensation berechnen:

$$h_{cd} = \Phi_{cd} / (A_{ro} (\vartheta_i - \vartheta_{roi})) \quad [W m^{-2} K^{-1}] \quad (Gl. 11)$$

Bezieht man den Wärmeübergangskoeffizienten h_{cd} für Kondensation auf den inneren Wärmeübergangskoeffizienten h_i , erhält man den Anteil latenter Wärme am Wärmeübergang innen am Dach:

$$p_{lat} = h_{cd} / h_i \quad [-] \quad (Gl. 12)$$

Wärmestrom durch Luftwechsel

Der Wärmeverbrauchscoeffizient U_{cs} beinhaltet die Wärmeübertragung durch Transmission und Luftwechsel:

$$U_{cs} = U_T + U_{air} \quad [W m^{-2} K^{-1}] \quad (Gl. 13)$$

Mit dem Luftwechsel durch Undichtigkeiten wird Wärme Φ_{air} sensibel und latent abgegeben:

$$\Phi_{air} = V_{air} \rho_a (c_{pa} (\vartheta_i - \vartheta_e) + r_0 (x_i - x_e)) \quad [W] \quad (Gl. 14)$$

Der Luftwechselwärmeverlust ist messtechnisch schwierig zu bestimmen. Deshalb wird zunächst der Transmissionswärmestrom Q_T für alle Oberflächen ermittelt:

$$\Phi_T = \Phi_{roT} + \Phi_{sw} + \Phi_{ga} \quad [W] \quad (Gl. 15)$$

Der Transmissionswärmestrom durch das Dach Φ_{ro} lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$\Phi_{roT} = \Lambda_{gl} A_{ro} (\vartheta_{roi} - \vartheta_{roe}) \quad [W] \quad (Gl. 16)$$

Der Luftwechselwärmeverlust ergibt sich dann aus der Differenz zwischen zugeführter Heizenergie und dem Transmissionswärmestrom:

$$\Phi_{air} = \Phi_{cs} - \Phi_T \quad [W] \quad (Gl. 17)$$

Nach Gleichung 14 kann man den Luftwechselwärmestrom in einen sensiblen (An_{sen}) und einen latenten Anteil (An_{lat}) aufteilen:

$$An_{sen} = c_{pa} (\vartheta_i - \vartheta_e) \quad [kJ/kg] \quad (Gl. 18)$$

$$An_{lat} = r_0 (x_i - x_e) \quad [kJ/kg] \quad (Gl. 19)$$

Damit lässt sich ein relativer Anteil p_{lat} der latenten Wärme berechnen:

$$p_{lat} = An_{lat} / (An_{lat} + An_{sen}) \quad [-] \quad (Gl. 20)$$

PAR- und Strahlungsdurchlässigkeit

Zur Messung der Strahlungs- und PAR-Durchlässigkeit werden Quantum-Sensoren LI-190 der Firma LI-COR Environmental, Messbereich 400 bis 700 nm, Messfehler $\pm 5\%$ und Solarimeter CMP 6 der Firma Kipp und Zonen, Messbereich 310 bis 2800 nm, Zero Offset $< 12 W/m^2$, Temperaturfehler (-10 bis $+40^\circ C$) $< 4\%$, eingesetzt. Zur Messung des solaren Energieeintrages in das Gewächshaus wurde in jeder Unterabteilung jeweils ein Solarimeter oberhalb der Gitterbinder angebracht. Ein weiteres Solarimeter wurde außen auf dem First des Gewächshauses installiert, um die Energiedurchlässigkeit des Gewächshausdaches zu bestimmen. Zur Messung der PAR

wurden in jeder Abteilung in Höhe des Pflanzenbestandes drei Quantum-Sensoren verteilt. Ein weiterer Sensor wurde außen neben dem Solarimeter angeordnet.

Zur Ermittlung der Solar- und PAR-Durchlässigkeit wurden alle Sensoren im Zeitintervall von 15 s gemessen und die Messwerte über den Tag von 8 bis 17 Uhr integriert. Die Durchlässigkeit ergibt sich jeweils als Integral des Sensors innen zum Integral des Sensor außen:

$$\tau_{\text{PAR}} = \frac{\int_{08}^{17} \text{PAR}_i}{\int_{08}^{17} \text{PAR}_e} * 100 \quad [\%] \quad (\text{Gl. 21})$$

$$\tau_{\text{sol}} = \frac{\int_{08}^{17} \text{sol}_i}{\int_{08}^{17} \text{sol}_e} * 100 \quad [\%] \quad (\text{Gl. 22})$$

Ergebnisse

Zur Auswertung der Wärmeverbrauchsmessungen wurden die Berechnungen nach dem vorgegebenen Messintervall alle 15 s durchgeführt und anschließend Mittelwerte für jede Messung in der Nacht von 22 bis 5 Uhr gebildet. Mit dieser Mittelwertbildung werden kleinere Störeinflüsse durch auftretende Schwankungen der Klimabedingungen und der Wärmeströme herausgefiltert. Die für die Verrechnung verwendeten Gewächshausabmessungen und Konstanten sind in **Tabelle 3** angegeben.

Tab. 1

Verzeichnis der Formelzeichen

Table 1: List of abbreviations

Symbol <i>Symbol</i>	Beschreibung <i>Description</i>	Dimension <i>Dimension</i>
A	Fläche/ <i>area</i>	m ²
An	Anteil/ <i>part</i>	-
cp	Wärmekapazität/ <i>heat capacity</i>	J kg ⁻¹ K ⁻¹
d	Dicke einer Schicht/ <i>thickness of the layer</i>	m
h	Wärmeübergangskoeffizient/ <i>heat transfer coefficient</i>	W m ⁻² K ⁻¹
P	Teil/ <i>part</i>	-
p	relative Anteil/ <i>portion</i>	-
PAR	photosynthetisch aktive Strahlung/ <i>photosynthetic active radiation</i>	μmol m ⁻² s ⁻¹
R	Wärmewiderstand/ <i>resistance of heat transfer</i>	m ² K W ⁻¹
r ₀	Verdampfungswärme <i>enthalpy of evaporation of water</i>	J kg ⁻¹
sol	Solarstrahlung/ <i>solar radiation</i>	W m ⁻²
V	Luftwechsellvolumen/ <i>volume of air exchange</i>	m ³ s ⁻¹
V	Wasser-Durchfluss/ <i>water flux</i>	m ³ h ⁻¹
v	Windgeschwindigkeit/ <i>wind speed</i>	M s ⁻¹
x	Wassergehalt der Luft/ <i>water content of the air</i>	kg kg ⁻¹
Δh	Enthalpie-Differenz <i>enthalpy difference of exchanged air</i>	kJ kg ⁻¹
Δθ	Temperaturdifferenz <i>temperature difference within a layer</i>	K
θ	Temperatur/ <i>temperature</i>	°C
λ	Wärmeleitfähigkeit/ <i>heat conduction coefficient</i>	W m ⁻¹ K ⁻¹
ρ	Dichte/ <i>density</i>	kg m ⁻³
Φ	Wärmestrom/ <i>energy flux</i>	W
Λ	Wärmedurchlasskoeffizient <i>internal heat transfer coefficient of covering material</i>	W m ⁻² K ⁻¹
τ	Durchlässigkeit/ <i>transmittance</i>	-

Tab. 2

Verzeichnis der Indizes

Table 2: List of indices

Indizes <i>Indices</i>	Beschreibung <i>Description</i>
a	Luft/ <i>air</i>
air	Luftwechsel/ <i>air exchange</i>
cd	Kondensation/ <i>condensation</i>
cs	Verbrauch/ <i>consumption</i>
cv	Konvektion/ <i>convection</i>
e	außen, extern/ <i>external</i>
ga	Giebel/ <i>gable</i>
gl	Glas/ <i>glass</i>
i	innen/ <i>inside</i>
in	Vorlauf/ <i>inlet</i>
L	Undichtigkeit/ <i>leakage</i>
lat	latent/ <i>latent</i>
o	oberhalb der Schirme/ <i>above the screens</i>
out	Rücklauf/ <i>outlet</i>
p	Druck/ <i>pressure</i>
PAR	Photosynthetisch aktive Strahlung <i>photosynthetic active radiation (400-700 nm)</i>
r	Strahlung/ <i>radiation</i>
ro	Dach/ <i>roof</i>
s	Oberfläche/ <i>surface</i>
sat	gesättigt/ <i>saturation</i>
sen	sensible/ <i>sensible</i>
sol	Solar/ <i>solar</i>
sw	Stehwand/ <i>side wall</i>
T	Transfer/ <i>transmittance</i>
v	Wasserdampf/ <i>vapour</i>
w	Wind/ <i>wind</i>
w	Wasser/ <i>water</i>

Tab. 3

Daten für die Verrechnung
Table 3: Data for calculation

Gewächshausabmessungen (pro Abteilung)/Greenhouse dimensions (1 compartment)			
Grundfläche/Greenhouse ground area	A_{gr}	432,0	m ²
Dachfläche/Roof area	A_{ro}	464,4	m ²
Stehwand/Side wall	A_{sw}	180,0	m ²
Giebel/Gable	A_{ga}	62,4	m ²
Hüllfläche/Surface area	A_s	732,0	m ²
Konstante/Constant			
Spezifische Wärme der Luft/Heat capacity of air	c_{pa}	1,0056	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
Verdampfungswärme von Wasser/Energy of vaporisation of water	r_0	2257	kJ kg ⁻¹
Dichte der Luft/Density of air	ρ_a	-0,0043 9 + 1,2912	kg m ⁻³
Wärmedurchlasskoeffizient von Isolierglas/Internal heat transfer coefficient of double glass	Λ	4,87	W m ⁻² K ⁻¹
Wärmedurchlasskoeffizient einer Stegvierfachplatte/Internal heat transfer coefficient of 4-layer PMMA	Λ	2,04	W m ⁻² K ⁻²

Wärmeverbrauchs-koeffizient

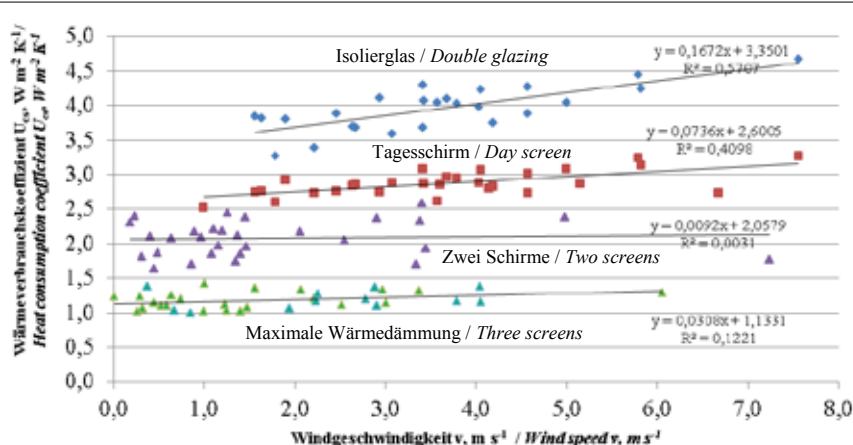
Abbildung 1 zeigt die berechneten Wärmeverbrauchs-koeffizienten U_{cs} in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Erwartungsgemäß ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen der Isolierverglasung ohne Schirme und der Isolierverglasung mit den verschiedenen Schirmvarianten. Betrachtet man die Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, wird deutlich, dass bei Isolierverglasung ohne Schirme der Wärmeverbrauchs-koeffizient mit zunehmender Windgeschwindigkeit signifikant ansteigt. Werden Schirme geschlossen, reduziert sich die Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und die berechneten Steigungen der Regressionsgraden sind nicht signifikant. Anhand der ermittelten Wärmeverbrauchs-koeffizienten kann man für den Nachtbetrieb Energieeinsparungen für die verschiedenen Maßnahmen berechnen. In Tabelle 4 sind die mittleren U_{cs} -Werte und die Einsparungen im Vergleich zu einer Einfachverglasung mit einem Wert von $U_{cs} = 7,6 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ [4], sowie einem herkömmlichen Standard aus Einfachverglasung

und Energieschirm angegeben ($U_{cs} = 4,6 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$). Demnach beträgt die Energieeinsparung der maximalen Wärmedämmung mit Isolierverglasung, Tagesschirm, Energieschirm und Verdunklung im Vergleich zur Einfachverglasung 84 %, im Vergleich zur Isolierverglasung 70 % und im Vergleich zur Einfachverglasung mit Energieschirm (Standard) 74 %. Mit Isolierverglasung und zwei Energieschirmen wird eine Einsparung von 72 bzw. 54 % erreicht. Für den Tagesschirm ergeben sich Einsparungen von 62 bzw. 38 %. Die Isolierverglasung erreicht ohne Schirme 48 bzw. 14 % Einsparung.

Wärmeübergang am Dach innen

Für den Wärmeübergang von der Luft im Gewächshaus an das Bedachungsmaterial kann gemäß Gleichung 9 ein Wärmeübergangskoeffizient h_i berechnet werden. In Abbildung 2 sind als Beispiel berechnete Wärmeübergangskoeffizienten als Funktion der Windgeschwindigkeit aufgetragen. Man erkennt, dass der innere Wärmeübergangskoeffizient erwartungsgemäß

Abb. 1



Wärmeverbrauchs-koeffizienten U_{cs} -Werte als Funktion der Windgeschwindigkeit (Mittelwerte von 22–5 Uhr)
Fig. 1: Heat consumption coefficients U_{cs} as a function of wind speed (mean values from 22 pm to 5 am)

Tab. 4

Wärmeverbrauchscoeffizienten und Einsparungen des Niedrigenergiegewächshauses
 Table 4: Heat consumption coefficient U_{cs} and energy saving of the low energy greenhouse

Maßnahme zur Wärmedämmung Methods for energy saving	Gemessen Measured	Einsparung Saving	Einsparung Saving	Einsparung Saving
	U_{cs} -Wert U_{cs} -value $W m^{-2} K^{-1}$	Isolierglas double glazing $U_{cs} = 4,0$ %	Einfachglas single glazing $U_{cs} = 7,6$ %	Einfachglas + Energieschirm single glass + thermal screen $U_{cs} = 4,6$ %
Isolierglas Double glazing	4,0	0	48	14
Isolierglas + Tagesschirm Double glass + day screen	3,0	27	62	38
Isolierglas + zwei Schirme Double glass + double screens	2,1	47	72	54
Isolierglas + drei Schirme Double glass + three screens	1,2	70	84	74

nicht von der Windgeschwindigkeit abhängig ist. Die Steigung der Regressionsgerade ist nicht signifikant. Es ergibt sich für den Messzeitraum 17.12.2011 bis 12.01.2012 ein Mittelwert von $h_i = 14,0 W m^{-2} K^{-1}$. Der innere Wärmeübergangskoeffizient ist nach Literaturangaben [4] abhängig vom Heizungssystem und von der Evapotranspiration der Pflanzen bzw. der latenten Wärmeübertragung am Bedachungsmaterial. Da die Gebläsekonvektoren vom Klimacomputer mit unterschiedlichen Drehzahlen angesteuert werden, sind deutliche Unterschiede der internen Luftzirkulation und damit Unterschiede beim konvektiven Wärmeübergang zu erwarten. Allerdings wird dieser Einfluss auf den inneren Wärmeübergang durch die Energieschirme gemindert, sodass ein entsprechender Einfluss messtechnisch nicht festgestellt werden konnte.

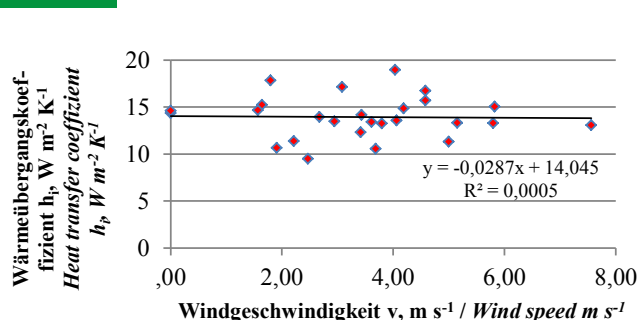
Wärmeübergang durch Kondensation am Dach innen

Von Bedeutung ist auch der Wärmeübergang durch Kondensation von Wasserdampf am Dach innen, der entscheidend von der Evaporation der Pflanzen beeinflusst wird. Der latente Anteil lässt sich mit den Gleichungen 10 bis 12 berechnen. In **Abbildung 3** ist als Beispiel der relative Anteil der latenten Wärme am inneren Wärmeübergang im zeitlichen Verlauf dargestellt. Am Tag „1“ war das Gewächshaus leer, die vorangegangene Kultur geräumt. Der latente Anteil wird kleiner. Am Tag „5“ wurden Pflanzen getopft und in das Gewächshaus gestellt. Mit zunehmendem Wachstum der Pflanzen steigt der latente Anteil wieder an. Eine eindeutige Abhängigkeit vom Blattflächenindex oder von den Bewässerungszyklen konnte nicht ermittelt werden, da die Kondensation u.a. auch von der Außentemperatur abhängig ist.

Einfluss der Kondensation auf den Wärmeverbrauchscoeffizienten

Um den Einfluss der Evapotranspiration auf den Wärmeverbrauch zu ermitteln, soll der Einfluss der Kondensation

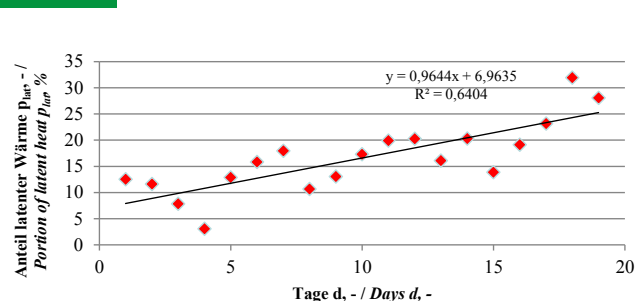
Abb. 2



Wärmeübergangskoeffizient innen (h_i) als Funktion der Windgeschwindigkeit (Mittelwerte nachts von 22 bis 5 Uhr, 17.12.2011 - 12.01.2012)

Fig. 2: Heat transfer coefficient inside the roof (h_i) (mean values from 22 pm to 5 am)

Abb. 3



Anteil latenter Wärme am inneren Wärmeübergang des Daches (plat) (Mittelwerte von 22 bis 5 Uhr, 13.02.-2.03.2012) (erste Topfpflanzen am 5. Tag)

Fig. 3: Portion of latent heat at the heat transfer (plat) inside the roof (mean values from 22 pm to 5 am) (days 1 to 4 without a crop, from day 5 with new potted plants)

Tab. 5

Einfluss der Kondensation (latenter Wärme) auf den Wärmeverbrauch (Annahme: ohne Kondensation $h_i = 8$; mit Kondensation $h_i = 14 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)
 Table 5: Influence of condensation (latent heat transfer) on the heat consumption (assumption: without condensation $h_i = 8$; with condensation $h_i = 14 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)

	U_{cs} gemessen measured $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$	Widerstände Heat resistance $1/U_{cs}$ $h_i = 14$	Widerstände Heat resistance einzeln single	Widerstände Heat resistance $1/U_{cs}$ $h_i = 8$	U_{cs} berechnet calculated $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$	Einfluss Kondensation increase by latent heat %
Isolierglas Double glazing	4,0	0,25	0,18	0,30	3,3	17,7
Isolierglas + Tagesschirm Double glazing + day screen	3,0	0,33	0,08	0,39	2,6	13,8
Isolierglas + zwei Schirme Double glazing + double screens	2,1	0,48	0,14	0,53	1,9	10,1
Isolierglas + drei Schirme Double glazing + three screens	1,2	0,83	0,36	0,89	1,1	6,0
Wärmeübergangskoeffizient innen h_i Heat transfer coefficient inside	14,0	0,07	0,07	0,13	8,0	

auf den Wärmedurchgang durch das Dach näher betrachtet werden. Auf dem Weg, den die Luft von innen nach außen zurücklegt, muss die Wärme mehrere Widerstände überwinden. Diese Widerstände kann man als Kehrwert des Wärmeübergangswiderstandes innen am Dach und als Kehrwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten berechnen. In **Tabelle 5** sind die Ergebnisse dargestellt. Für die unterschiedlichen Wärmedämmmaßnahmen wurden die ermittelten U_{cs} -Werte verwendet und daraus die Widerstände als $1/U_{cs}$ berechnet. Da es sich um eine Kombination von hintereinander geschalteten Widerständen handelt, kann man die Einzelwiderstände berechnen (**Tabelle 5**, 3. Spalte). Für den inneren Wärmeübergang am Dach wurde ein Wärmeübergangskoeffizient von $h_i = 14$ (s.o.) ermittelt. Nimmt man vereinfachend an, dass ohne Kondensation der Wärmeübergangskoeffizient $h_i = 8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ beträgt [4], dann kann man für jede Wärmedämmmaßnahme die Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten durch Kondensation berechnen (**Tabelle 5**, 5. Spalte). Dieses Rechenbeispiel zeigt, dass bei Isolierverglasung ohne Energieschirme der Einfluss der Kondensation auf den Energieverbrauch ca. 18 % und bei Isolierverglasung mit drei Energieschirmen nur noch ca. 6 % beträgt. Dabei wurde der latente Anteil am Wärmestrom durch Luftwechsel nicht berücksichtigt.

Luftwechselwärmestrom

Jedes Gewächshaus weist mehr oder minder große Undichtigkeiten auf. Diese Undichtigkeiten können an Lüftungsclappen und an der Verglasung auftreten. Eine quantitative Bewertung ist schwierig. Mittels Gleichung 13 bis 17 kann der Luftwechselwärmestrom berechnet werden. In **Abbildung 4** ist der Wärmeverbrauchskoeffizient für Luftwechsel in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit aufgetragen. Die Steigung der Regressionsgeraden ist signifikant. Diese Werte gelten für ein Gewächshaus mit Isolierverglasung ohne Energieschirme. Werden die

Energieschirme geschlossen, dann ist mit den o.a. Gleichungen kein Luftwechselwärmestrom zu ermitteln. In **Abbildung 5** sind die Ergebnisse dargestellt. Es ergibt sich keine Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Die Wärmeverbrauchskoeffizienten für Luftwechsel streuen um die Null-Linie. Da der Luftwechselwärmestrom gemäß Gleichung 14 bis 16 als Restglied berechnet wird, gehen die Fehler bei der Berechnung der Wärmeströme durch das Dach, die Stehwände und die Giebel in das Ergebnis mit ein. Es wird aber deutlich, dass durch das Schließen der Energieschirme nicht nur der Transmissionswärmestrom, sondern auch der Lüftungswärmestrom deutlich reduziert wird.

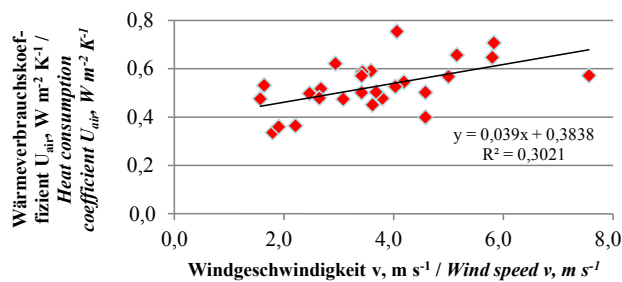
Latenter Anteil am Lüftungswärmestrom

Gemäß Gleichung 14 wird mit dem Luftwechsel sensible und latente Wärme abgegeben. Der latente Anteil ist wiederum von der Evapotranspiration der Pflanzen abhängig. In **Abbildung 6** ist der latente Anteil am Luftwechsel als Funktion der Außentemperatur aufgetragen. Man erkennt eine deutliche Abhängigkeit von der Außentemperatur. Der Anstieg der Regressionsgeraden ist signifikant. Bei Außentemperaturen über 0 °C wird die Streuung um die Regressionsgerade etwas größer.

V-Luft-Wert (V_{air}) zur Abschätzung der Wirkung von Energieschirmen

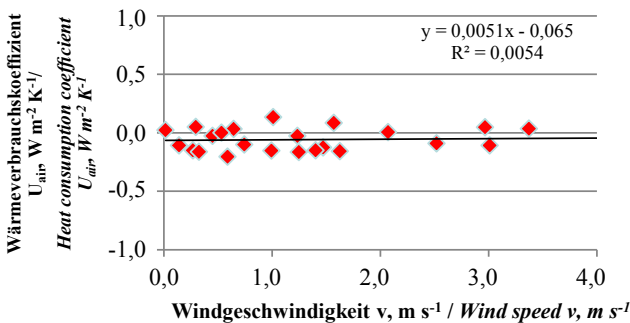
Da Wärmeverbrauchsmessungen relativ aufwendig sind und nur unter konstanten Bedingungen brauchbare Daten liefern, wurde mit Gleichung 8 für jede Versuchsanstellung ein mittlerer V-Luft-Wert berechnet und in **Abbildung 7** als Funktion des Wärmeverbrauchskoeffizienten U_{cs} aufgetragen. Die Ergebnisse können durch ein Polynom 2. Grades verbunden werden. Damit ist die Steigung der Regressionskurve bei größeren U_{cs} -Werten größer und damit das Verfahren genauer als bei kleinen U_{cs} -Werten. Für einen Energieschirm ist diese Methode deshalb

Abb. 4



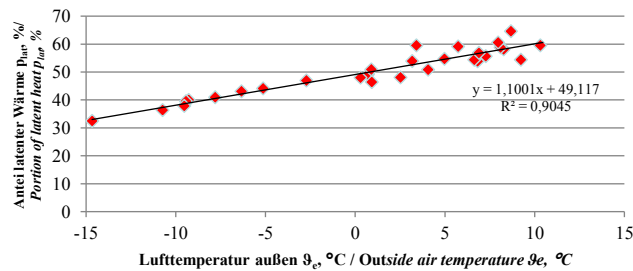
Wärmeverbrauchscoefizient für Luftwechsel (U_{air}) als Funktion der Windgeschwindigkeit, Isolierverglasung (Energieschirme offen, 15.12.2011 - 12.01.2012)
 Fig. 4: Heat consumption coefficient for air exchange (U_{air}) through leakages as a function of wind speed, double glazing (screens open) (15.12.2011 - 12.01.2012)

Abb. 5



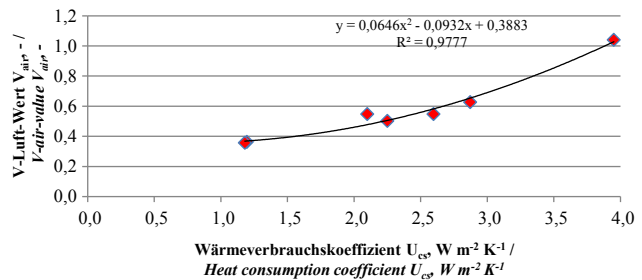
Wärmeverbrauchscoefizient für Luftwechsel (U_{air}) als Funktion der Windgeschwindigkeit, Isolierverglasung + drei Energieschirme (Mittelwerte von 22 bis 5 Uhr)
 Fig. 5: Heat consumption coefficient for air exchange through leakages (U_{air}) as a function of wind speed, double glazing and three thermal screens (mean values from 22 pm to 5 am)

Abb. 6



Anteil latenter Wärme (p_{lat}) am Luftwechselwärmestrom in Abhängigkeit der Außentemperatur (Mittelwerte von 22 bis 5 Uhr, 26.01. - 13.03.2012)
 Fig. 6: Portion of latent heat at the heat consumption (p_{lat}) by air exchange as a function of outside air temperature (mean values from 22 pm to 5 am, 26.01. - 13.03.2012)

Abb. 7



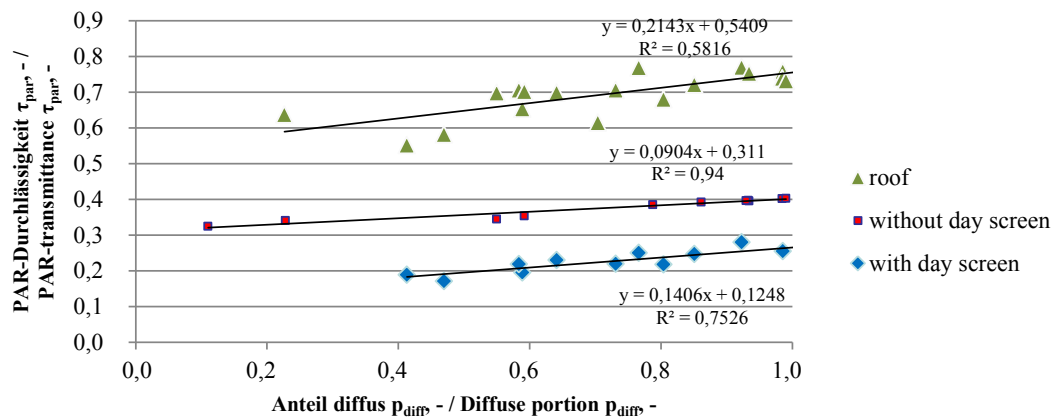
V-Luft-Wert (V_{air}) als Funktion des Wärmeverbrauchscoefizienten U_{cs} , Mittelwerte aus den Messungen Isolierverglas, Isolierglas mit Tagesschirm, Isolierglas mit zwei Schirmen und Isolierglas mit drei Schirmen
 Fig. 7: V-air-value (V_{air}) as a function of the heat consumption coefficient (U_{cs}), mean values of measurements with double glazing, double glazing with day screen, double glazing with two screens and double glazing with three screens

gut geeignet. Bei zwei oder drei Energieschirmen werden die Unterschiede des V-Luft-Wertes immer kleiner. Bei U_{cs} -Werten kleiner 2,5 ist diese Methode zu ungenau.

PAR-Durchlässigkeit

Die Ergebnisse der Wärmeverbrauchsmessungen zeigen, dass mit Isolierverglasung und drei Energieschirmen eine deutliche Reduzierung des Wärmeverbrauches möglich ist. Aus kulturtechnischer Sicht ist es wichtig, zu klären, wie diese Maßnahmen die PAR-Durchlässigkeit vor allem im Winter reduzieren. In **Abbildung 8** sind Messwerte der PAR-Durchlässigkeit für den Zeitraum 8.02. bis 3.03.2012 in Abhängigkeit des diffusen Anteils der Globalstrahlung dargestellt. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass bei einer Nord-Süd-Ausrichtung des Gewächshauses die PAR-Durchlässigkeit vom Anteil diffuser Strahlung abhängig ist. Im Winter ist bei niedrigem Sonnenstand der Einfallswinkel für direkte Strahlung ungünstig, sodass bei der Messung oberhalb der Energieschirme (Durchlässigkeit des Daches) nur 60 % der Außenstrahlung gemessen werden. Bei diffuser Strahlung sind das 75 %. Dieser Unterschied ist im Dezember und Januar noch größer. In dieser Zeit liegt die PAR-Durchlässigkeit bei direkter Strahlung bei 45 %. **Abbildung 8** zeigt weiterhin, dass die PAR-Durchlässigkeit in Höhe des Pflanzenbestandes deutlich reduziert ist (40 % bei diffuser und 30 % bei direkter Strahlung). Dieser niedrige Wert wird durch die Energieschirmpakete verursacht, die bei geöffneten Schirmen (am Tage) noch ca. 0,4 m breit sind (bei 4 m Binderabstand). Weiterhin wurde das Versuchsgewächshaus für volle Schneelast konzipiert: Die Tragkonstruktion ist deutlich stärker dimensioniert als bei einem konventionellen Produktionsgewächshaus und erzeugt daher eine größere Verschattung. Die installierte Beleuchtungsanlage steigert diesen Effekt noch. Wird am Tage der Tagesschirm geschlossen, dann führt das zu einer zusätzlichen Reduktion der PAR-Durchlässigkeit um ca. 35 %.

Abb. 8



PAR-Durchlässigkeit (par) eines Gewächshauses in Nord-Süd-Ausrichtung, Messungen des Daches (über den Schirmsystemen) und in Höhe des Pflanzenbestandes mit und ohne Tagesschirm (08.02.–03.03.2012)

Fig. 8: PAR-transmittance (par) of a greenhouse north-south orientated, roof (above the screens), at the height of plant canopy with and without day screen (08.02.–03.03.2012)

Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen des Niedrigenergiegewächshauses in der LVG Hannover-Ahlem zeigen, dass mit den Wärmedämmmaßnahmen der Energieverbrauch deutlich gesenkt werden kann. Im Vergleich zu einem einfachverglasten Gewächshaus beträgt die ermittelte Einsparung über 80 %, im Vergleich mit einem Gewächshaus mit Einfachverglasung und Energieschirm immer noch 70 %. Mit dem vorgestellten methodischen Ansatz ist es möglich, die Wärmeströme genauer zu analysieren. So kann ein innerer Wärmeübergangskoeffizient ermittelt und der Anteil latenter Wärme am Wärmeübergang bestimmt werden. Der ermittelte Anteil latenter Wärme ist allerdings von der Evapotranspiration der Kultur abhängig und kann deshalb nicht verallgemeinert werden. Das Berechnungsbeispiel in Tabelle 4 zeigt, dass mit zunehmender Wärmedämmung der Einfluss des latenten Wärmestroms auf den Wärmeverbrauch immer kleiner wird. Die Ermittlung des Lüftungswärmestromes als Restglied der einzelnen Transmissionswärmeströme ist ungenau und liefert nur bei geöffneten Energieschirmen plausible Werte.

Die ermittelte Energieeinsparung gilt für konstante Bedingungen mit Temperaturdifferenzen größer 10 K zwischen innen und außen. Bei unterschiedlichen Tag-Nacht-Temperaturen spielt das Wärmespeicherverhalten des Gewächshauses eine größere Rolle, sodass im „normalen“ Betrieb mit niedrigeren Nachttemperaturen teilweise U_{cs} -Werte von $0,6 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ gemessen wurden. Das deutet auf weitere Energiesparmöglichkeiten durch dynamische Regelstrategien hin, die zurzeit untersucht werden. Als Folge energiesparender Maßnahmen stellt sich im Gewächshaus eine höhere Luftfeuchte ein, da die Kondensationsrate durch die Isolierverglasung und die Energieschirme verringert wird. Nachts wurden zeitweise Luftfeuchten von über 95 % r.f. gemessen. Bisher wurden keine negativen Auswirkungen auf die Kultur beobachtet. Es muss aber in weiteren Versuchen geklärt werden, ab welcher Luftfeuchte sich das Infektionsrisiko durch Pilzkrankheiten erhöht.

Die gemessene PAR-Durchlässigkeit ist für Topfpflanzen im Winter zu gering, sodass bei der Umsetzung des Niedrigenergiegewächshauses in die Praxis besonderer Wert auf eine möglichst hohe PAR-Durchlässigkeit gelegt werden muss. Um den Schattenwurf durch tragende Bauteile so gering wie möglich zu halten, sind bei der Planung eine Minimierung der Tragkonstruktion und möglichst große Scheibenabmessungen anzustreben. Die Energieschirme und die Verdunklung sollten als aufliegendes System mit Schubstangenantrieb ausgeführt werden, da dann die Schirmpakete viel kleiner zusammengeschieben werden können und wenig Schatten werfen. Die Verdunklung wurde in dem Versuchsgewächshaus zwischenzeitlich umgerüstet. Bei der Ausrichtung der Gewächshausanlage sollte möglichst eine Ost-West-Aufstellung gewählt werden, weil dann im Winter die PAR-Durchlässigkeit höher ist.

Literatur

- [1] KTBL (2012): Zukunftsinitiative Niedrigenergiegewächshaus. www.zineg.de, Zugriff am 28. März 2012
- [2] KTBL (2008): Bericht zur Bestimmung und Bewertung des Energiebedarfs von Gewächshäusern. KTBL-Workshop, 17.09.2008 in Worms
- [3] Meyer, J. (1982): Bewertung von beweglichen Energieschirmen im Hinblick auf den Energieverbrauch. Gartenbautechnische Informationen Heft 11, Institut für Technik in Gartenbau u. Landwirtschaft, Universität Hannover
- [4] 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

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.

Danksagung

Die Projektförderung erfolgt durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit sowie der Landwirtschaftlichen Rentenbank unter Federführung des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz mit Unterstützung der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung.