

- [3] *Cruse, T.A.*: Numerical solutions in three dimensional elastostatics. Int. J. Solids Structures Bd. 5 (1969) S. 1259/74.
- [4] *Lachat, J.C.*: A further development of the boundary integral technique for elastostatics. Ph. D. Thesis Univ. of Southampton 1975.
- [5] *Rizzo, F.J. u. D.J. Shippy*: An advanced boundary integral equation method for three-dimensional thermoelasticity. Int. J. Num. Meth. Eng. Bd. 11 (1977) S. 1753/68.
- [6] *Neureiter, W.*: Boundary-Element-Programmrealisierung zur Lösung von zwei und dreidimensionalen thermoelastischen Problemen mit Volumenkräften. Diss. TU München 1982.
- [7] *Drexler, W.*: Ein Beitrag zur Lösung rotationssymmetrischer thermoelastischer Kerbprobleme mittels der Randintegralgleichungsmethode. Diss. TU München 1982.
- [8] *Kuhn, G. u. W. Möhrmann*: Boundary-Element-Method in elastostatics, theory and applications. Unveröffentlichtes Manuskript.
- [9] *Radaj, D., W. Möhrmann u. G. Schilberth*: Efficiency and emergence investigation: Boundary Element Method versus Finite Element Method. Zur Veröffentlichung eingereicht bei Numerical Methods in Engineering.
- [10] *Danson, D.J.*: A boundary element formulation of problems in linear isotropic elasticity with body forces "Boundary Element Methods". Proc. of the 3rd Int. Seminar (Juli 1981) Irvine, California (Ed. C.A. Brebbia), S. 105/22.
- [11] *Zienkiewicz, O.C.*: The Finite Element Method. 3rd Ed. Maidenhead-Berkshire/England: McGraw Hill 1977; u. Methode der finiten Elemente. 2. Aufl., München/Wien: C. Hanser 1975.
- [12] *Gallagher, R.H.*: Finite-Element-Analysis. Englewood Cliffs N.J.: Prentice Hall 1975; u. Finite Element Analysis. Berlin/Heidelberg/New York: Springer 1976.
- [13] *Schwarz, H.R.*: Methode der finiten Elemente. Stuttgart: Teubner 1980.
- [14] *Kloth, W. u. Th. Stroppel*: Kräfte, Beanspruchungen und Sicherheiten in den Landmaschinen. Z. VDI Bd. 80 (1936) S. 85/92.
- [15] *Kloth, W.*: Spannungs- und Verformungsfelder als Grundlage der festigkeitgerechten Gestaltung von Landmaschinen. Grndl. Landtechnik H. 11 (1959) S. 105/109.
- [16] *Kloth, W.*: Leichtbauaufibel. Wolfratshausen bei München: Verlag Neureuter 1947.
- [17] *Kloth, W.*: Atlas der Spannungsfelder in technischen Bauteilen. Düsseldorf: Verlag Stahl Eisen 1961.
- [18] *Neuber, H.*: Kerbspannungslehre. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag 1937 (1. Aufl.) u. 1958 (2. Aufl.).
- [19] *Sawin, G.N.*: Spannungserhöhung am Rande von Löchern. Berlin: VEB-Verlag Technik 1956 (Übersetzung 1. Aufl., Moskau 1951, russisch).
- [20] *Sawin, G.N.*: Stress distribution around holes. NASA Techn. Transl. F-607, Nov. 1970 (Übersetzung 2. Aufl., Kiew 1968, russisch).
- [21] *Radaj, D.*: Kerbspannungen an Öffnungen und starren Kernen. Habilitationsschrift Techn. Univ. Braunschweig 1970. Eigenverlag Stuttgart.
- [22] *Radaj, D. u. G. Schilberth*: Kerbspannungen an Ausschnitten und Einschlüssen. Düsseldorf: Deutscher Verlag f. Schweißtechnik 1977.
- [23] *Holzemer, K.H.*: Berechnungsverfahren für Gummi und deren Einsatz bei der Entwicklung von Gummibauteilen. VDI-Berichte 444 Düsseldorf: VDI-Verlag 1982, S. 109/20.
- [24] *Banerjee, P.K. u. R. Butterfield*: Developments in Boundary Element Methods, Bd. 1. London: Appl. Science Publishers 1979.
- [25] *Kuhn, G.*: Numerische Behandlung von Mehrfachrisen in ebenen Scheiben. ZAMM Bd. 61 (1981) S. T105-T106.
- [26] *Tanaka, M., M. Hamada u. Y. Iwata*: Computations of a two-dimensional stress intensity factor by the Boundary Element Method. Ingenieur-Archiv Bd. 52 (1982) S. 95/104.
- [27] *Banerjee, P.K. u. R.P. Shaw*: Developments in Boundary Element Methods, Bd. 2. London: Appl. Science Publishers 1982.

Forschung für die Technik der Pflanzenproduktion in Gewächshäusern

Von Christian von Zabeltitz, Hannover*)

Professor Dr.-Ing. Wilhelm Batel zum 60. Geburtstag

DK 635:631.23:631.344.5.001.5

Die Gartenbaubetriebe mit Pflanzenproduktion in Gewächshäusern sind vor allem durch die Steigerung der Energie- und Arbeitskosten sehr stark belastet. Es müssen weiterhin große Anstrengungen unternommen werden, die Wettbewerbsfähigkeit der Betriebe zu erhalten. Ausgehend von Grundlagenuntersuchungen, sind in verstärktem Maße Techniken zu entwickeln und Gesetzmäßigkeiten zu untersuchen, die für den praktischen Gartenbau eine Hilfe für Entscheidungen über technische Betriebsmittel darstellen.

*) Prof. Dr.-Ing. Chr. von Zabeltitz ist Leiter des Instituts für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft der Universität Hannover.

1. Einleitung

Die gärtnerische Pflanzenproduktion aus Obstbau, Gemüsebau, Zierpflanzenbau und Baumschulwirtschaft wird in der Statistik der Landwirtschaft zugerechnet. Diese gärtnerischen Sparten nehmen nur etwa 1 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche ein, erzielen darauf aber 10 % der Verkaufserlöse der landwirtschaftlichen Produktion. In der Bundesrepublik gibt es in 24 000 Betrieben mit Pflanzenproduktion in Gewächshäusern etwa 3 400 ha Gewächshausfläche, von der etwa 2 600 ha mit Zierpflanzen belegt sind. Der Rest wird bis auf eine geringe Fläche in Obstbau und Baumschule für die Gemüseproduktion genutzt.

Ende 1980 gab es insgesamt 539 ha Kunststoffgewächshäuser, von denen 377 ha mit Folie eingedeckt waren. 32 ha Gewächshausfläche sind als Doppelbedachung mit Acryl-Stegdoppelplatten und

etwa 48 ha mit verschweißtem Isolierglas eingedeckt. Dazu kommen weitere Flächen, die mit Polycarbonat-Hohlkammerplatten und mit geklebtem Isolierglas gedeckt sind. Die Energieeinsparung bei festen Doppelbedachungen gegenüber Einfachglas beträgt je nach Ausführung 30 bis 40 %. Die Anwendung und die schnelle Verbreitung solcher Isolierverglasungen wird jedoch durch die relativ hohen Investitionskosten beschränkt.

Die Verwendung von Heizöl EL für die Gewächshausheizung geht durch Sparmaßnahmen und Umstellung auf andere Energieträger stetig zurück. In Nordrhein-Westfalen beispielsweise sank der Anteil des Heizöls an der Gewächshausheizung zwischen 1975 und 1980 von 75 % auf 55 %, der Anteil der Kohle stieg von 4 % auf über 10 %.

2. Forschungsschwerpunkte

Die kostenintensivsten Faktoren bei der Pflanzenproduktion in Gewächshäusern sind und bleiben neben der Investition für die Gewächshäuser selbst

- Energie
- Arbeit
- Wasser.

Neben den Energiekosten gewinnen die Arbeits- und in zunehmendem Maße die Wasserkosten immer mehr an Bedeutung. Bewässerungssysteme im Gewächshaus, die bei optimaler Pflanzenbewässerung eine geringe Wasserverdunstung und damit einen geringeren latenten Wärmestrom und geringere Kondensation am Dach zur Folge haben, gehören gleichzeitig zu den energiesparenden Maßnahmen.

Die Konzeption der Forschungsaufgaben in Hannover umfaßt folgende Schwerpunkte:

1. Energiesparende Maßnahmen bei herkömmlichen Gewächshäusern und Kesselanlagen
 - Wärmedämmung an der Gewächshauhüllfläche
 - Einsatz energiesparender Heizungssysteme
 - Energiesparende Bewässerungssysteme
 - Energieeinsparung an der Kesselanlage
 - Erhöhung der Nettokulturfläche in Gewächshäusern bei annähernd gleichem Energieverbrauch
2. Einsatz von Mikrocomputern zur Klimaregelung in Gewächshäusern
3. Einsatz nichtfossiler Energiequellen für die Gewächshausheizung
4. Die Entwicklung neuer Gewächshauskonzeptionen für die Pflanzenproduktion
 - Gewächshäuser mit minimalem Energieverbrauch bei maximalem Lichteinfall
 - Kunstlichträume
 - Geschlossene Gewächshausssysteme für aride Gebiete
5. Klimamessungen und -berechnungen in Gewächshäusern.

Der bisherige Stand der Technik und die Ergebnisse der Forschungsvorhaben sind in einer Schriftenreihe des Instituts [1] sowie in Buchveröffentlichungen zusammengefaßt [2, 3, 4]. Im folgenden werden einige Beispiele aus den Forschungsvorhaben dargestellt.

2.1 Wärmeströme im Gewächshaus

Maßnahmen zur Energieeinsparung können wirkungsvoll ergriffen werden, wenn man weiß, wie und wo Wärmeverluste am Gewächshaus auftreten und durch welche Wärmeströme der Wärmetransport hervorgerufen wird. Die Wärmeströme in einem Gewächshaus sind schematisch in Bild 1 dargestellt. Um die Wirkung verschiedener Heizsysteme, Bewässerungssysteme, Isolierverglasungen und Energieschirme beurteilen zu können, müssen die einzelnen Wärmeströme quantitativ erfaßt werden.

Mit diesem Ziel hat *Tantau* Simulationsmodelle für Gewächshäuser aufgestellt, und zwar ein statisches Modell [5] zur Erfassung der

Energieeinsparung unter Doppelbedachungen und ein dynamisches Modell [6] im Hinblick auf eine energieoptimale Klimaregelung. Aufbauend auf bisherigen Forschungsarbeiten und eigenen Messungen, hat *v. Elsner* [7] für geschlossene Gewächshäuser ein Simulationsmodell erstellt, mit dem die Wirkung von Außenklima, Gewächshauskonstruktion, Heizungssystem, Pflanzenbestand und Boden auf die Klimazustände im Pflanzenbestand und den Wärmeverbrauch ermittelt werden kann. Ziel der Berechnungen war die Beschreibung des instationären Temperatur- und Wärmestromverhaltens eines Gewächshauses im Hinblick auf eine Dimensionierung von Heizungssystemen und Energiesparmaßnahmen sowie die Beschreibung der wechselseitigen Beeinflussung von Klimatisierungsmaßnahmen und Pflanzenbestand. Alle Einflußgrößen und Kenngrößen des Gewächshausklimas, der Pflanzenbestandseigenschaften mit Einschluß der Stomataöffnungen sowie der zeitlich veränderlichen Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten werden durch ein System nichtlinearer Differentialgleichungen beschrieben und miteinander verknüpft.

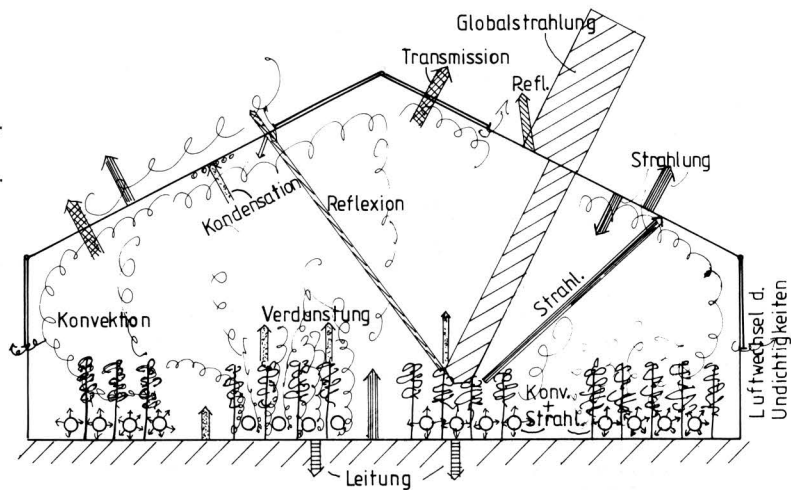


Bild 1. Wärmeströme in einem beheizten Gewächshaus am Tag.

2.2 Energieverbrauch für die Gewächshausheizung

Bevor man Entscheidungen über den Einsatz energiesparender Maßnahmen oder anderer Energiequellen trifft, muß man wissen, wieviel Heizenergie zu bestimmten Zeiten verbraucht wird. Für die Auslegung von Heizungen und die Aufteilung von Heizleistungen in Grund- und Spitzenlast sollte daher nicht nur die maximale Heizleistung, sondern auch die Häufigkeitsverteilung der Heizleistungen bekannt sein. Aus Klimadaten für einen Zeitraum von 20 Jahren wurden deshalb der Heizenergieverbrauch und die Häufigkeiten auftretender Heizleistungen für die Gewächshausheizung berechnet [8, 9].

Der spezifische Heizenergieverbrauch q in Watt pro m^2 Gewächshausgrundfläche ist als Funktion der zeitabhängigen Größen Außentemperatur und Freilandglobalstrahlung zu errechnen mit:

$$q = k' (A_H/A_G) (t_i - t_a) - D q_{SF} \eta_S \quad (1),$$

darin sind

q	Heizenergieverbrauch (W/m^2)
A_H	Gewächshauhüllfläche (m^2)
A_G	Gewächshausgrundfläche (m^2)
k'	Wärmeverbrauchskoeffizient (W/m^2K)
t_i	Gewächshausinnentemperatur (K)
t_a	Außentemperatur (K)
D	Strahlungsdurchlässigkeit des Gewächshauses (-)
q_{SF}	Freilandglobalstrahlung (W/m^2)
η_S	Faktor für die Umsetzung von Globalstrahlung in Wärmeenergie im Gewächshaus (-).

Der Wärmeverbrauchs­koeffizient ist abhängig von Gewächshaus­konstruktion, Bedachungs­material und Einbauten zur Energie­einsparung, Heizungssystem, Bewässerung und Außenwitterung (Wind, Niederschlag, Bewölkung).

Der tägliche Heizenergiebedarf verändert sich im Laufe des Jahres sehr stark, **Bild 2**. Aber auch im Verlaufe eines Tages sind sehr unterschiedliche Heizleistungen erforderlich, so daß das Heizungssystem über einen weiten Bereich schnell regelbar sein muß. Beispielsweise wird an einem mittleren Märztag nach Klimadaten für Hannover morgens zwischen 4 und 6 Uhr eine durchschnittliche Heizleistung, bezogen auf die Gewächshausgrundfläche, von 190 W/m², mittags um 12 Uhr dagegen nur eine Heizleistung von 10 W/m² benötigt.

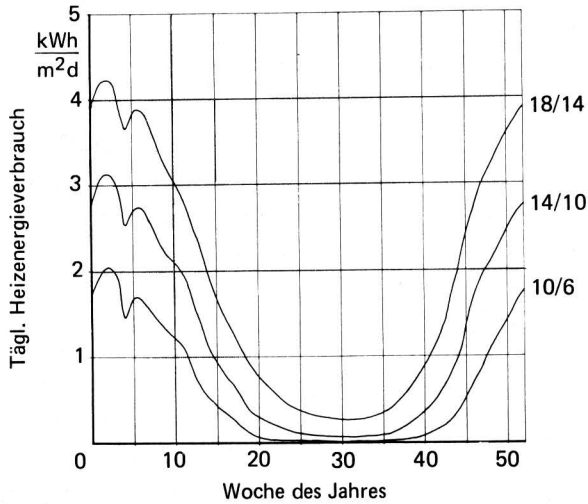


Bild 2. Täglicher Heizenergieverbrauch pro m² Gewächshausgrundfläche in Abhängigkeit von der Jahreszeit für verschiedene Sollwerte (Tag/Nacht) der Gewächshausinnentemperatur. Einfachglas und Klima von Hannover.

In **Bild 3** ist die Häufigkeit (in Stunden pro Jahr) dargestellt, mit der eine bestimmte Heizleistung bei vorgegebenen Solltemperaturen im Gewächshaus benötigt wird. Daneben ist auch die Häufigkeitsverteilung der Außentemperaturen in Hannover zu entnehmen. Es zeigt sich, daß die Auslegung Heizleistung für das Heizungssystem nach DIN 4701 (entsprechend Temperaturen unter -14 °C) nur während weniger Stunden des Jahres benötigt wird. Für eine bessere Auslastung der einzelnen Wärmeerzeuger, d.h. einen besseren Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers durch Betrieb nahe bei der Nennleistung, sind hier Verbesserungen möglich durch Aufteilung in Grund- und Spitzenlast oder durch Spitzenlastspeicher.

2.3 Bewegliche Energieschirme

Bewegliche Energieschirme werden innerhalb bestehender Gewächshäuser nachts zugezogen. Am Tage ist weitgehend voller Lichteinfall gewährleistet. Da 70 bis 75 % der Heizenergie nachts benötigt wird, ist insgesamt eine große Energieeinsparung zu erwarten, wenn das mechanische System und das Schirmmaterial einige wichtige Anforderungen erfüllen.

Mechanisches System:

- Sehr gute Abdichtung an Fundament, Giebel und Stehwand, damit keine Kaltluft einfallen kann
- Keine Zugbeanspruchung für das Material
- Geringe Lichtminderung am Tag

Schirmmaterial:

- Geringe Durchlässigkeit für langwellige Wärmestrahlung (> 3000 nm)

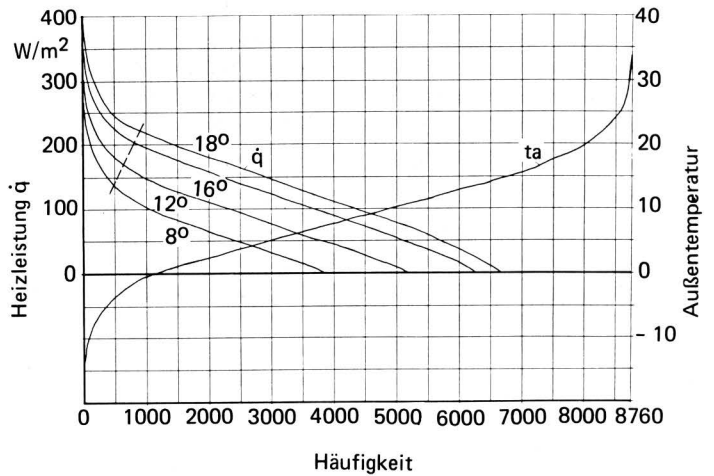


Bild 3. Häufigkeit (Stunden pro Jahr) verschiedener Außentemperaturen und der erforderlichen Heizleistungen für unterschiedliche Innentemperaturen.

- Hohes Reflexions- und geringes Abstrahlungsvermögen für langwellige Wärmestrahlung
- Ausreichende Wasserdampfdurchlässigkeit.

Zusammen mit der Gewächshausindustrie wurde ein bewegliches Energieschirmsystem entwickelt, **Bild 4**, welches die genannten Forderungen weitgehend erfüllt. Je nach den Eigenschaften des verwendeten Materials wurden mit diesem Energieschirm im Vergleich zu Einfachglas Energieeinsparungen während der Nacht von 35–57 % gemessen [10]. Diese Einsparungswerte sind Optimalwerte bei sehr gut abgedichtetem System. In der Praxis werden so hohe Werte kaum erreicht.

Bisher erfolgte die Ermittlung der Energieeinsparung durch Bestimmung des Wärmeverbrauchs­koeffizienten k' mit Hilfe von gemessenen Werten nach Gl. (1). Gemessen wurde nachts; der zweite Summand von Gl. (1) wird dann null. Diese Messungen sind sehr aufwendig und können in der Praxis nicht durchgeführt werden. Deshalb hat Meyer [11] ein Verfahren entwickelt, mit dem anhand weniger Temperaturmeßwerte auf die Energieeinsparung von Energieschirmen in der Praxis geschlossen werden kann. Es wird die Differenz aus der mittleren Temperatur des Heizungssystems und der Gewächshausinnentemperatur t_i ins Verhältnis gesetzt zur Differenz von Innen- und Außentemperatur:

$$V_H = \frac{t_{Hm} - t_i}{t_i - t_a}$$

darin ist die mittlere Heizkörper­temperatur $t_{Hm} = (t_V + t_R)/2$ das arithmetische Mittel aus Vorlauf- und Rücklauf­temperatur der Heizung.

Wenn der Faktor V_H bei offenem und geschlossenem Energieschirm in einem Gewächshaus durch Messung der entsprechenden

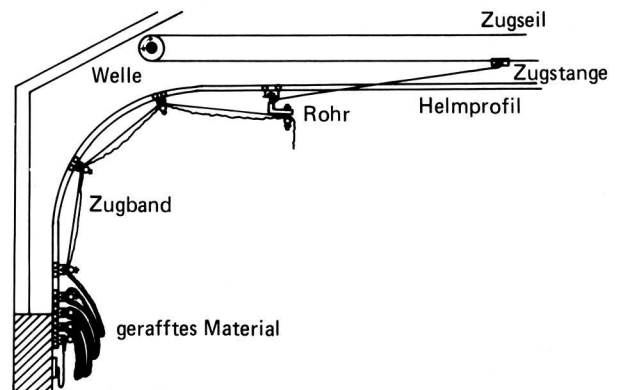


Bild 4. Bewegliches Energieschirmsystem zur Energieeinsparung in Gewächshäusern.

Temperaturen bestimmt wird, so ist die Differenz ein Maß für die Energieeinsparung. Zahlreiche Vergleichsmessungen haben ergeben, daß zwischen dem Faktor V_H und dem Wärmeverbrauchs-koeffizienten k' nach Gl. (1) eine funktionale Zuordnung mit geringer Streuung besteht, **Bild 5**.

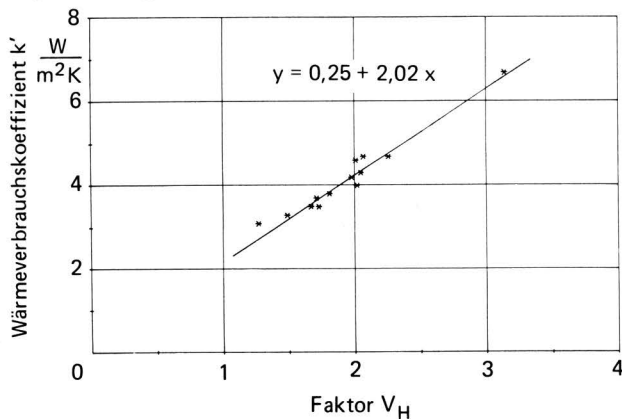


Bild 5. Zusammenhang zwischen Wärmeverbrauchs-koeffizient und Faktor V_H bei einem Energieschirm mit verschiedenen Materialien.

2.4 Heizung mit Wärmequellen niedriger Temperatur (Abwärme)

Es gibt viele Industriebetriebe, einschließlich der Kraftwerke, die Niedertemperaturenergie (Temperaturen unter 60 °C) als Abwärme produzieren, welche für die Gewächshausheizung nutzbar wäre, wenn eine Reihe von Problemen gelöst werden [3, 12]. Mit sinkender Heizwassertemperatur nimmt die Wärmeabgabe der Heizflächen ab. Als Abhilfe kann man die Heizfläche vergrößern oder den Wärmeübergang vom Heizsystem an die Luft verbessern. Eine Heizflächenvergrößerung ist verbunden mit Unterbringungsschwierigkeiten und Lichtminderung im Gewächshaus. Wird andererseits der Wärmeübergang von Wärmetauschern beispielsweise durch Zwangs-konvektion mit Hilfe von Gebläsen verbessert, so steigt der erforderliche Stromverbrauch stark an. Um den Stromverbrauch für die Luftförderung bei Heizkörpern zu minimieren, hat *v. Elsner* [13] einen sogenannten Induktionskonvektor entwickelt und erprobt, **Bild 6**. Der Konvektor arbeitet solange bei freier Konvektion, wie die Wärmeabgabe im Niedertemperaturbetrieb ausreicht. Nur in der Zeit höheren Wärmebedarfs wird durch einen perforierten Folienschlauch Luft mit hoher Geschwindigkeit durch den Konvektor geblasen. Diese Luftströmung induziert einen Sekundärluftstrom seitlich aus dem Gewächshaus, so daß ein Mehrfaches der Fördermenge des Ventilators an Luft durch den Konvektor strömt.

3. Zusammenfassung

Für den technischen Bereich bei der Pflanzenproduktion in Gewächshäusern werden Forschungsschwerpunkte zusammengestellt und ausgewählte Beispiele von Forschungs- und Entwicklungsaufgaben dargestellt. Bisher standen bei diesen Aufgaben die Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauches für die Gewächshausheizung und Maßnahmen zur optimalen Klimagegestaltung im Gewächshaus im Vordergrund. Im weiteren werden daneben Forschungsaufgaben für die Arbeiterleichterung und Arbeitszeitverkürzung sowie für die Einsparung von Gießwasser und für die Verringerung der Erstellungskosten von Gewächshäusern zunehmend an Bedeutung gewinnen, wenn die Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Gartenbaus auch in Zukunft erhalten werden soll.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

[1] •Gartenbautechnische Informationen.

Schriftenreihe aus dem Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft der Universität Hannover.
Taspo Buchvertrieb Braunschweig.

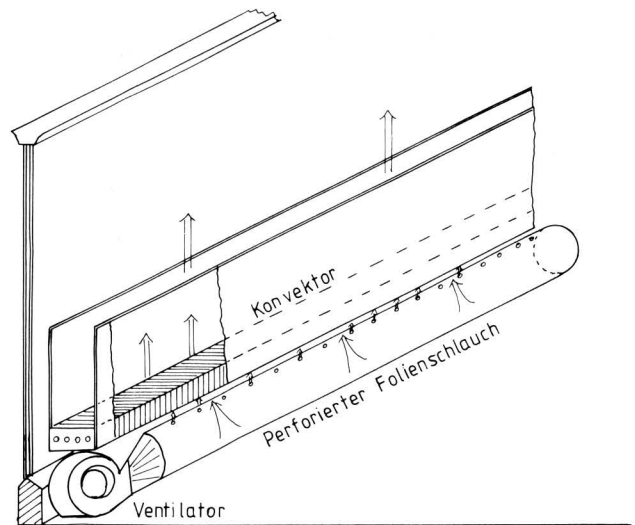


Bild 6. Niedertemperaturkonvektor für freie und erzwungene Konvektion.

- [2] •von Zabeltitz, Chr.: Gewächshäuser. Planung und Bau. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer 1978.
- [3] •von Zabeltitz, Chr. (Hrsg.) mit H. Bredenbeck, J. Damrath, B. von Elsner, F.J. Klein, D. Kohlmeier, J. Meyer, M. Rüther, K. Schockert, H.J. Tantau: Energieeinsparung und alternative Energiequellen im Gartenbau. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer 1982.
- [4] •Tantau, H.J.: Heizungsanlagen im Gartenbau. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer; erscheint 1983.
- [5] •Tantau, H.J.: Der Einfluß von Einfach- und Doppelbedachungen auf das Klima und den Wärmehaushalt von Gewächshäusern. Gartenbautechnische Informationen Heft 4, Braunschweig: Taspo Buchvertrieb 1975.
- [6] •Tantau, H.J.: Analyse des Regelverhaltens klimatisierter Gewächshäuser als Grundlage zur Auswahl und Entwicklung geeigneter Regler. Gartenbautechnische Informationen Heft 7, Braunschweig: Taspo Buchvertrieb 1979.
- [7] von Elsner, B.: Das Kleinklima und der Wärmeverbrauch von geschlossenen Gewächshäusern. Ein Simulationsmodell zur gartenbautechnischen Bewertung unter Berücksichtigung des Einflusses von Standortklima, Pflanzenbestand und Gewächshauskonstruktion. Diss. Univ. Hannover 1982. Erscheint als gartenbautechnische Information im Taspo Buchvertrieb Braunschweig.
- [8] •Damrath, J.: Tabellen zur Heizenergieermittlung von Gewächshäusern. Klima Hannover. Gartenbautechnische Informationen Heft 8, Braunschweig: Taspo Buchvertrieb 1980.
- [9] •Damrath, J.: Tabellen zur Heizenergieermittlung von Gewächshäusern. Klima München/Weihenstephan. Gartenbautechnische Informationen Heft 9, Braunschweig: Taspo Buchvertrieb 1981.
- [10] •Meyer, J.: Bewegliche Energieschirme. Gartenbautechnische Informationen Heft 10, Braunschweig: Taspo Buchvertrieb 1981.
- [11] Meyer, J.: Bewertung von beweglichen Energieschirmen im Hinblick auf den Wärmeverbrauch von Gewächshäusern. Diss. Univ. Hannover 1982. Erscheint als Gartenbautechnische Information.
- [12] von Zabeltitz, Chr.: Alternative Energiequellen für die Gewächshausheizung. Taspo-Magazin (1981) Nr. 6, S. 7/11.
- [13] von Elsner, B.: Konvektoren für die Niedertemperaturheizung des Gewächshauses. Gärtnerbörse und Gartenwelt Bd. 80 (1980) H. 22, S. 484/86.