

Transpirationsmassenstromporometer zur Klimaregelung in Gewächshäusern

Dipl.-Ing. U. Schmidt, KDT/Dr. agr. C. Förtsch, KDT, Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Sektion Landtechnik

Voraussetzung für eine exakte Regelung des Klimas im Gewächshaus ist die präzise Meßdatenerfassung im On-line-Verfahren. Dabei ist weniger die Meßgenauigkeit der eingesetzten Sensoren, sondern die Ausschaltung von Störfaktoren und die richtige Positionierung der Sensoren von ausschlaggebender Bedeutung.

Eine weitere Bedingung für ein optimales Beherrschen des Klimas im Gewächshaus ist neben der meßtechnischen Erfassung der Regelgrößen auch ihre geeignete Auswahl aus der Vielfalt der sich gegenseitig beeinflussenden Klima- und Wachstumsfaktoren.

Der internationale Trend auf diesem Gebiet der Prozeßautomatisierung geht zur Einbeziehung pflanzlicher Zustandsgrößen in die Klimaregelung [1].

Bisher beschränkt sich die Regelung des Gewächshausklimas lediglich auf die Regelung der Innenlufttemperatur. Die Luftfeuchte ging dabei günstigenfalls nur als Regelrestriktion in eine Heizungsregelung ein. Eine große Bedeutung für das pflanzliche Wachstum hat die Gewebetemperatur der Pflanze selbst. Diese wird jedoch bisher weder in die Regelung meßtechnisch einbezogen noch selbst regelungstechnisch beeinflusst.

Mit Hilfe dieses Meßgeräts ist es möglich, durch entsprechende Meß- und Datenverarbeitungssoftware die momentane Transpirationsrate und den stomatären Leitwert einzelner Pflanzenblätter zu ermitteln. Das auf der Basis des Küvettenmeßverfahrens von Schmidt entwickelte Meßgerät wurde als Transpirationsmassenstromporometer bezeichnet und im Jahr 1988 zum Patent angemeldet (WP G 01 H/3147605). Es besteht aus mehreren Küvetten, dem eigentlichen Meßgerät und einem nicht im Gewächshaus befindlichen Kleinrechner. Die

Küvetten sind Halbschalen (Volumen 945 cm³) aus licht- und wärmestrahlungsdurchlässigem Material, zwischen denen intakte Blätter eingeklemmt werden. Die Meßküvetten sind mit einem Sammelgefäß (Dewargefäß) durch flexible Luftschläuche verbunden. Ein zweites Gefäß dient als Referenzmeßkammer. In den Sammelgefäßen befinden sich je ein Thermoelement zur Temperaturmessung und je ein speziell entwickeltes Miniaturpsychrometer zur Messung der psychrometrischen Feuchttemperatur. Letzere sind so gestaltet, daß sich ein von ei-

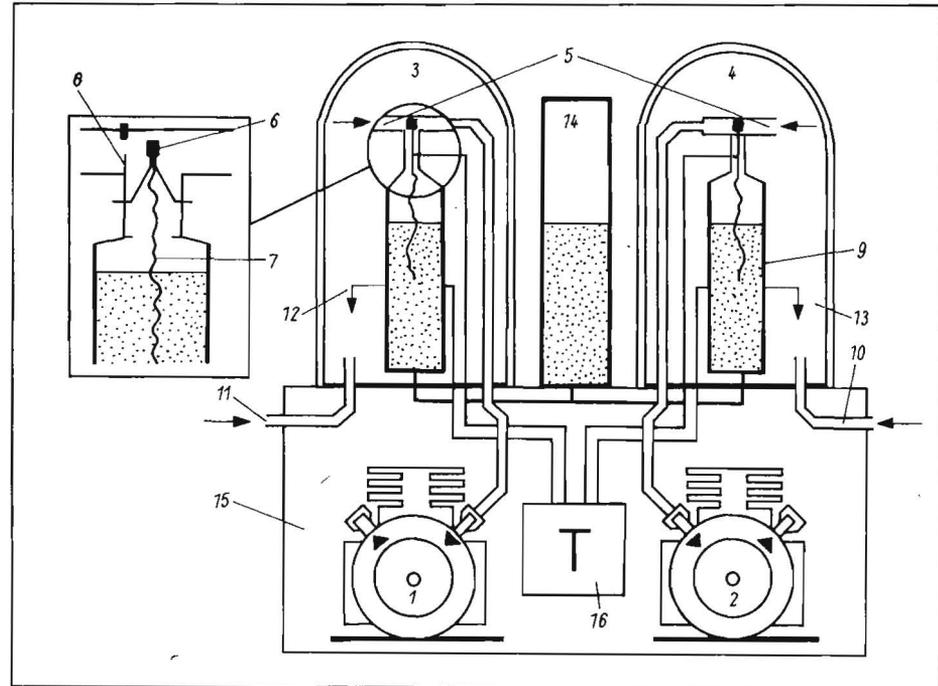
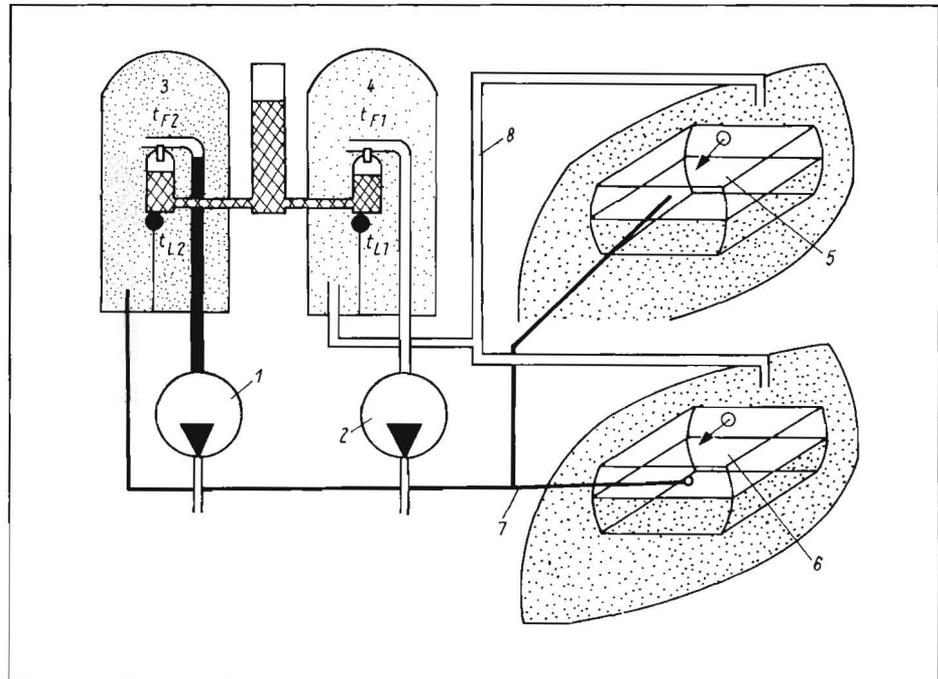


Bild 1. Konstruktive Gestaltung des Meßgehäuses;

- 1, 2 Membranpumpen, 3, 4 Sammelgefäße, 5 Ansaugstelle der Membranpumpen, 6 befeuchtetes Thermoelement, 7 Baumwollfaden, 8 Lochblende, 9 Wasserbehälter, 10 Verbindung zu den Meßküvetten, 11 Verbindung zur Ansaugstelle des Referenzluftstroms, 12, 13 Thermoelemente zur Lufttemperaturmessung, 14 Füllstandskontrolle, 15 Meßgehäuse, 16 Meßwandler

Bild 2. Meßprinzip des Transpirationsmassenstromporometers;

- 1, 2 Membranpumpen, 3, 4 Sammelgefäße, 5, 6 Meßküvette, 7 Ansaugschlauch für Meßküvette, 8 Ansaugschlauch für Referenzluftstrom



Eine weitere wichtige Zustandsgröße der Pflanze wäre die Öffnungsweite ihrer Spaltöffnungen. Diese ist von zahlreichen Klimafaktoren und pflanzlichen Prozessen abhängig und steht in engem Zusammenhang mit der Photosyntheserate. Die Kenntnis dieser Zustandsgröße ergäbe wichtige Hinweise über die Wirkung einzelner Klimatisierungsmaßnahmen. Besonders Interesse dürfte in Zukunft die Führung des CO₂-Niveaus im Gewächshaus nach dieser pflanzlichen Zustandsgröße beanspruchen.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde im Wissenschaftsbereich Gartenbautechnik der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg für das Verfahren der Klimaregelung im Gewächshaus nach der computersimulierten Pflanzenbestandstemperatur (CPT-Regelung) [2] ein Klimakomplexmeßgerät entwick-

nem dünnen Baumwollfaden umwickeltes Thermoelement hinter einer Lochblende befindet. Die Enden des Baumwollfadens hängen in kleinen Wasserbehältern. Die Sammelgefäße, die Befeuchtungseinrichtung und die für die Erzeugung von Einheitsmeßsignalen notwendigen Meßwandler sind zusammen mit zwei Membranpumpen in einem Gehäuse integriert (Bild 1).

Arbeitsweise des Transpirationsmassenstromporometers

Mit Hilfe der beiden Membranpumpen wird in den Sammelbehältern ein Unterdruck erzeugt, durch den zwei Luftströme angetrieben werden. In den einen Sammelbehälter wird Luft gesaugt, die die Meßküvetten durchströmt hat, und in den zweiten Sammelbehälter gelangt Luft aus der unmittelbaren Umgebung der Küvettenansaugöffnungen (Bild 2).

In den Meßbehältern wird zunächst die Temperatur des Luftstroms erfaßt. An den Ansaugstellen im Meßbehälter wird dann durch Lochblenden der Luftstrom stark beschleunigt und zu hinter den Lochblenden befindlichen befeuchteten Thermoelementen geleitet, die auf die Feuchttemperatur abgeköhlt werden.

Daraus ergeben sich somit 4 Temperaturmeßwerte, die über eine entsprechende Interfaceschaltung in einen außerhalb des Meßgeräts befindlichen Rechner geleitet werden.

Mit Hilfe eines iterativen Berechnungsverfahrens wird durch Gl. (1) der Wasserdampfpartialdruck der feuchten Luft berechnet, aus dem sich entsprechend den physikalischen Gesetzen der feuchten Luft die übrigen Zustandsgrößen des Wasserdampf-Luft-Gemisches ergeben:

$$p_D = p_D^*(t_f) + Le^{2/3} \frac{C_{PL}}{d(R_L/R_D)} (t_f - t_L)(p_m - p_D); \quad (1)$$

- p_D Wasserdampfpartialdruck der feuchten Luft in kPa
- $p_D^*(t_f)$ Sättigungsdampfdruck bei Feuchttemperatur in kPa
- Le Lewis-Zahl
- spezifische Wärmekapazität der feuchten Luft in $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- d Verdunstungsenthalpie des Wassers in kJ/kg
- R_L spezifische Gaskonstante von trockener Luft in kJ/kg
- R_D spezifische Gaskonstante von Wasserdampf in kJ/kg
- t psychrometrische Feuchttemperatur in $^\circ\text{C}$
- t_L Lufttemperatur in $^\circ\text{C}$
- p_m atmosphärischer Luftdruck in kPa.

Die Größe der Feuchtedifferenz zwischen den beiden Luftströmen, die meßtechnisch durch die Feuchtedifferenzmessung zwischen den beiden Meßbehältern realisiert wird, ist das Maß für die momentan transpirierte Wasserdampfmenge der in den Meßküvetten eingeschlossenen Blätter. Da die Luftströme mehrerer Meßküvetten in einem Sammelgefäß vermischt werden, entsteht mit der meßbaren Feuchtedifferenz ein „natürlicher“ Mittelwert der Wasserdampfabgabe an den einzelnen Meßstellen. Die aus der Feuchtedifferenz resultierende Transpirationsmenge wird durch Gl. (2) berechnet:

Bild 3 Meßfehler des Transpirationsmassenstromporometers e_t in Abhängigkeit vom Meßfehler der Temperaturmessung $e_{t_{\text{mess}}}$ und der Lufttemperatur t_L (q_L latenter Wärmestrom)

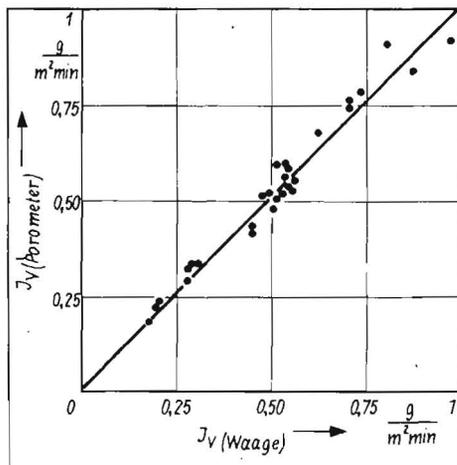
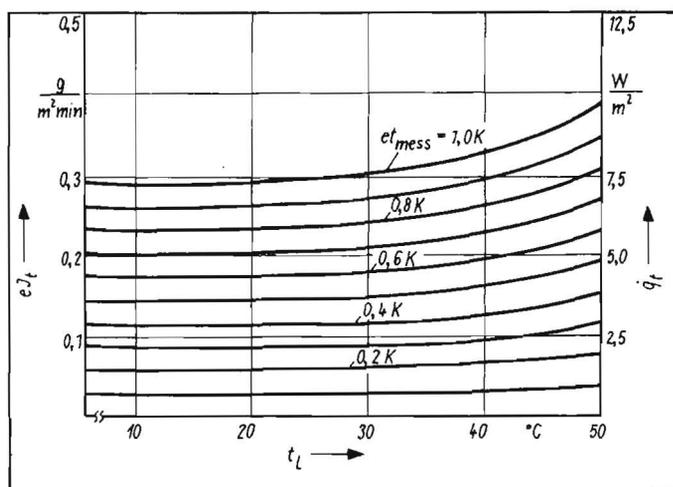


Bild 4. Vergleich zwischen der mit dem Massenstromporometer ermittelten Transpirationsmassenstromdichte $J_V(\text{Porometer})$ und der durch Wägung festgestellten Transpirationsmassenstromdichte $J_V(\text{Waage})$ ($n = 36$, $B = 0,97$, $r = 0,98$)

$$I_t = \frac{V_L}{F_b} (\rho_{L1} x_{L1} - \rho_{L2} x_{L2}); \quad (2)$$

- I_t Transpirationsmassenstromdichte der Blätter in den Küvetten in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- V_L durch die Küvetten geführter Volumenstrom in m^3/s
- F_b in den Küvetten befindliche Blattfläche in m^2
- ρ_{L1} Dichte des Luftstroms im Küvettenansauggefäß in kg/m^3
- x_{L1} absolute Luftfeuchte im Küvettenansauggefäß in kg/kg
- ρ_{L2} Dichte des Luftstroms im Referenzstromsammelgefäß in kg/m^3
- x_{L2} absolute Luftfeuchte im Referenzstromsammelgefäß in kg/kg .

Um den Meßvorgang exakt zu gewährleisten und die psychrometrischen Bedingungen einhalten zu können, wurden die folgenden Forderungen konstruktiv umgesetzt. Innerhalb der Meßküvetten wurden die Luft Eintritts- und Luftaustrittsstutzen in einer solchen Entfernung von der Blattfläche angeordnet, daß die blattnahe Temperatur- und Konzentrationsgrenzschicht nicht angeströmt wird. Der Luftstrom durch die Meßküvetten wurde dabei den Strömungsverhältnissen im Pflanzenbestand angepaßt. Er liegt geringfügig unterhalb der in diesem Bereich meßbaren Luftgeschwindigkeit von 0,2 m/s.

Bei Verwendung eines licht- und wärme-strahlungsdurchlässigen Materials (Polyäthylen) für die Küvetten werden damit im Küvetteninneren ähnliche Bedingungen wie in der freien Umgebung erzeugt.

Zur Einhaltung der psychrometrischen Bedingungen ist es erforderlich, die Feuchttemperatur unter Ausschaltung des Einflusses der Wärmestrahlung zu messen. Zur isenthalpen Abkühlung des Feuchtsensors bis zur Sättigungsdampflinie sind die strömungsdynamischen Bedingungen am Sensor einzuhalten. Die erste Bedingung wird durch die Verwendung der außen- und innenverspiegelten und doppelwandig-evakuierten Meßbehälter (Dewargefäße) erreicht. Der Wärmestrahlungsaustausch zwischen Sensor und Umgebung wird somit minimiert, und der eventuelle Einfluß der Geräteerwärmung auf den Meßvorgang ist durch die temperaturisolierende Wirkung der Gefäße ausgeschlossen.

Die zweite Bedingung wird durch die Beschleunigung des Luftstroms vor dem Auftreffen auf den Sensor mit Hilfe der Lochblenden erreicht. Nach Untersuchungen von Monteith [4] und Sonntag [5] ist die Anströmgeschwindigkeit der Sensoren mit 2 m/s hinreichend groß, kann aber bei Verwendung von Thermolementen wesentlich geringer sein. Zur Absicherung eines hohen psychrometrischen Wirkungsgrads wird die Luft trotz Verwendung von Thermolementen auf eine Geschwindigkeit von 2 m/s beschleunigt.

Der mit dem vorliegenden Verfahren zu erwartende Meßfehler wurde analytisch mit Hilfe des Gesetzes der Fehlerfortpflanzung aus dem Meßfehler der Temperaturmessung ermittelt und experimentell durch Vergleichsmessung mit verdunstenden Blattmodellen bestimmt, deren Wasserdampfabgabe durch Präzisionsmassedifferenzmessung ermittelt wurde.

Der bei einer Meßgenauigkeit der Thermolemente von 0,2 K ermittelte durchschnittliche Meßfehler bei der Ermittlung der Transpirationsmassenstromdichte betrug $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Daraus ergibt sich ein prozentualer Fehler von 4% vom Meßbereichsendwert von $33,3 \cdot 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (Bild 3).

Die in den experimentellen Untersuchungen ermittelte mittlere Abweichung zwischen den Meßergebnissen des Transpirationsmassenstromporometers und der Präzisionswägung von $0,1 \cdot 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ bestätigt die erreichbare Genauigkeit (Bild 4).

Das Transpirationsmassenstromporometer fungiert als Basisgerät für die Anwendung eines neuartigen, ebenfalls an der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg entwickelten Regelverfahrens.

Die von diesem Meßgerät in Verbindung mit einem Kleincomputer ermittelten Werte der Transpirationsmassenstromdichte von Pflanzenblättern können in Verbindung mit der von einem Gesamtstrahlungs-pyranometer ermittelten Nettostrahlungswärmestromdichte sowie mit der ebenfalls mit dem Porometer erfaßten Lufttemperatur und Luftfeuchte (Meßdaten des Referenzluftstroms) dazu verwendet werden, um auf der Grundlage der Wärmebilanzgleichung einzelner Pflanzenblätter die Temperatur des Pflanzenbestands zu simulieren.

Unter Zuhilfenahme eines elektrischen Analogiemodells ist es weiterhin möglich, den stomatären Leitwert der Pflanzenblätter zu bestimmen, der eine Maßzahl für die aktuelle Öffnungsweite der Spaltöffnungen der in

der Meßküvette eingeschlossenen Pflanzenblätter ist.

Als Ausgangswerte werden somit durch den Kleinrechner die folgenden Daten ausgegeben:

- mittlere Transpirationsmassenströmdichte des Pflanzenbestands
 - stomatärer Leitwert der Blätter des Bestands
 - Temperatur der Luft im Bestandsbereich
 - Luftfeuchte der Luft im Bestandsbereich.
- Bei der weiteren Erprobung des Transpirationsmassenstromporometers sollten auch Anwendungsmöglichkeiten geprüft werden, die nicht unmittelbar im Bereich des Gartenbaus liegen. So ist die Ermittlung der Wasserdampf-abgabe bestimmter Körper auch in anderen Wirtschaftszweigen, wie z. B. in der Bauindustrie (Trocknung von Betonelementen, Feuchtegehalt von Mauerwerk) oder in der Lagerwirtschaft (Wasserdampf-abgabe von Haufwerken bei der Getreide- und Kartoffellagerung), von Interesse.

Literatur

- [1] Hashimoto, J.: Computer control of short term plant growth by monitoring leaf temperature (Rechnergestützte Überwachung des Kurzzeitwachstums durch Aufzeichnung der Blattemperatur). Acta Horticulturae, The Hague 106(1980) S. 139–143.
- [2] Schmidt, U.: Die Temperatur des Pflanzenbestands als Regelgröße für die Klimaregelung im Gewächshaus unter besonderer Berücksichtigung der Heizungsregelung. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Forschungsbericht 1989 (unveröffentlicht).
- [3] Förtsch, C., u. a.: Grundlagen zur Solarenergienutzung in Gewächshäusern. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Forschungsbericht 1989 (unveröffentlicht).
- [4] Monteith, J. L.: Error and accuracy in thermocouple psychrometry (Fehler und Genauigkeit des Thermolementpsychrometers). Proc. physic. Soc. B. 67 (1954).
- [5] Sonntag, D.: Hydrometrie – Ein Handbuch der Feuchtigkeitsmessung in der Luft und anderen Gasen. Berlin: Akademie-Verlag 1966–1968.

A 5747

Einflußgrößen und Betriebscharakteristik eines Wärmehückgewinnungssystems mit Rippenrohren in einem Gewächshaus

Dr. -Ing. K. Bathke, Forschungszentrum für Mechanisierung und Energieanwendung in der Landwirtschaft Schlieben der AdL der DDR

Verwendete Formelzeichen

A_o	m^2	Gewächshausoberfläche
A_G	m^2	Gewächshausgrundfläche
A_K	m^2	Oberfläche des Rippenrohrregisters
c_w	$Wh/(kg \cdot K)$	spezifische Wärmekapazität von Wasser
E_a	W/m^2	Globalstrahlungsstärke im Freiland
f_A		Formfaktor des Gewächshauses ($f_A = A_o/A_G$)
k'	$W/(m^2 \cdot K)$	Wärmeverbrauchskoeffizient des Gewächshauses
k_K	$W/(m^2 \cdot K)$	Wärmedurchgangskoeffizient des Rippenrohrregisters
\dot{m}_w	kg/h	Massendurchsatz (Wasser)
\dot{Q}_K	W	Kühlleistung des Rippenrohrregisters
\dot{Q}_{Sir}	W	im Gewächshaus wirksame fühlbare Wärmeleistung der Globalstrahlung
\dot{Q}_{Tr}	W	gesamte Wärmeverlustleistung des Gewächshauses
t_a	$^{\circ}C$	Außentemperatur
t_i	$^{\circ}C$	Gewächshausinnentemperatur
t_v	$^{\circ}C$	Vorlauftemperatur (Rippenrohrregister)
t_R	$^{\circ}C$	Rücklauftemperatur (Rippenrohrregister)
\dot{V}_w	m^3/h	Volumendurchsatz (Wasser)
Δt_{Sir}	K	äquivalente Temperaturerhöhung im Gewächshaus infolge Globalstrahlung als fühlbare Wärme wirksamer Anteil der Globalstrahlung (Wirkungsgrad)

den Rückgewinnung und Nutzung mit Hilfe wassergekühlter Rippenrohre im Dachraum eines thermoverglasten Experimentalgewächshauses wurde in [1] berichtet. Nachfolgend soll die Abhängigkeit der am Tage erreichbaren mittleren Kühlleistung der Rippenrohre und der sich im Gewächshaus einstellenden Temperatur von den physikalisch-technischen und klimatischen Einflußgrößen vereinfachend dargestellt werden [2].

Die mittlere Kühlleistung entspricht der aus dem Gewächshaus nutzbaren Überschußwärme. Auf der Grundlage dieser Beziehungen werden die experimentellen Ergebnisse des untersuchten Systems verdichtet und in praktikabler Form auf beliebige Umgebungsbedingungen übertragen. Das Ziel der Betrachtung besteht darin, einerseits die konkreten Ergebnisse zu verallgemeinern und andererseits methodische Grundlagen für die Dimensionierung und energetische Bilanzierung derartiger Wärmerückgewinnungssysteme in Gewächshäusern zu schaffen.

2. Parameter der Experimentalanlage

Der Aufbau der Experimentalanlage in der LPG „Wilhelm Wolff“ Dresden wurde in [1] beschrieben. Die wichtigsten Parameter der Anlage sind:

- Gewächshaus: thermoverglastes Gewächshaus mit einer Grundfläche $A_G = 1000 m^2$ und einer Oberfläche $A_o = 1550 m^2$
- Wärmerückgewinnungssystem: 5 Rippenrohre mit einer Kühlfläche $A_K = 1100 m^2$ und einem Kühlwasserdurchsatz $\dot{V}_w = 23 m^3/h$; das erwärmte Wasser wird einem Speicher zugeführt und kann für die Nachheizung des Gewächshauses oder z. B. als Gießwasser genutzt werden.

3. Wärmeenergetische Beziehungen

Von dem im Gewächshaus wirksamen Anteil

\dot{Q}_{Sir} der Globalstrahlungsleistung wird ein Teil (\dot{Q}_{Tr}) als Transmissions-, Lüftungs- und Bodenwärme und der andere Teil als Kühlleistung (\dot{Q}_K) des Rippenrohrregisters aus dem Gewächshaus abgeführt:

$$\dot{Q}_{Sir} = \dot{Q}_{Tr} + \dot{Q}_K \quad (1)$$

$$\dot{Q}_K = c_w \dot{m}_w (t_R - t_v) = k_K A_K \left(t_i - \frac{t_v + t_R}{2} \right) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{Tr} = k' A_o (t_i - t_a) \quad (3)$$

Aus den Gln. (1) bis (3) ergibt sich die explizite Abhängigkeit der Gewächshausinnentemperatur t_i und der Kühlleistung \dot{Q}_K von den wesentlichen Einflußgrößen –

$$t_i = t_a + \Delta t_{Sir} + \frac{t_v - t_a - \Delta t_{Sir}}{1 + \frac{k' A_o}{k_K A_K} + 0,5 \frac{k' A_o}{c_w \dot{m}_w}} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_K = \frac{2 c_w \dot{m}_w}{1 + 2 c_w \dot{m}_w / k_K A_K} (t_i - t_v) \quad (5)$$

mit der äquivalenten Temperaturerhöhung Δt_{Sir} im Gewächshaus infolge der Globalstrahlung:

$$\Delta t_{Sir} = \frac{\dot{Q}_{Sir}}{k' A_o} = \frac{\eta_{Sir} E_a}{k' f_A} \quad (6)$$

Diese Beziehungen, die prinzipiell denen bei Beheizung des Gewächshauses [3] gleichen, sollen der zu erarbeitenden Betriebscharakteristik des Wärmerückgewinnungssystems zugrunde gelegt werden.

Der Begriff und die exakte Ermittlung der Gewächshausinnentemperatur t_i ist unter dem Einfluß der Globalstrahlung problematisch. Unter Praxisbedingungen und bei Verwendung üblicher Raumthermometer entspricht sie annähernd der Blattemperatur [4].

Die charakteristischen Größen η_{Sir} , k' und k_K sind keine eigentlichen Konstanten, sondern von den sich zeitlich ändernden inneren und