

Energiewirtschaftliche Fahrweise von Heizungs- und Lüftungssystemen in Gewächshäusern

Dr.-Ing. M. Bookholdt

Forschungszentrum für Mechanisierung und Energieanwendung in der Landwirtschaft Schlieben der AdL der DDR

Verwendete Formelzeichen

a_1		Konstante
A_G	m^2	Grundfläche des Gewächshauses
A_0	m^2	Oberfläche des Gewächshauses
c_w	$Wh/(kg \cdot K)$	spezifische Wärmekapazität des Heizmediums
D		Durchlaßgrad der Globalstrahlung
E_a	W/m^2	Globalstrahlung
f_A		Formfaktor des Gewächshauses
k'	$W/(m^2 \cdot K)$	Wärmeverbrauchs-koeffizient des Gewächshauses
k'_0	$W/(m^2 \cdot K)$	Wärmeverbrauchs-koeffizient des Gewächshauses bei $w = 0$ m/s
k_H	kW/K	spezifische Heizflächenleistung
$(k_H A_H)_{RH}$	kW/K	spezifische Heizflächenleistung der Rohrheizung
$K_{i,v}$		Übertragungsverhältnis Heizmediendurchsatz
\dot{m}_w	m^3/h	Anzahl zuzuschaltender Lufttheizer
n_{LH}		Wärmebedarf des Gewächshauses
Q_H	GJ	Wärmebedarf des Gewächshauses
\dot{Q}_{LH1}	kW	Heizleistung eines Einzel-lufttheizers
\dot{Q}_{RH}	kW	Heizleistung der Rohrheizung
\dot{Q}_{Soll}	kW	Heizleistungsbedarf des Gewächshauses
t_a	$^{\circ}C$	Außentemperatur
$t_{aStr.}$	$^{\circ}C$	fiktive Außentemperatur-erhöhung
t_i	$^{\circ}C$	Innentemperatur
t_{min}	$^{\circ}C$	minimal zulässige Innentemperatur
t_{iSoll}	$^{\circ}C$	Sollwert der Innentemperatur
t_l	$^{\circ}C$	Lüftungstemperatur
t_v	$^{\circ}C$	Vorlauftemperatur
t_{vSoll}	$^{\circ}C$	Sollwert der Vorlauf-temperatur
t_w	$^{\circ}C$	Vorlauftemperatur des zentralen Wärmenetzes
w	m/s	Windgeschwindigkeit
W_{Eit}	kWh	Elektroenergiebedarf des Gewächshauses
ϵ		Wirkungsgrad der Globalstrahlung

1. Problemstellung

Eine wesentliche Zielrichtung zur Steigerung der Effektivität der Produktion in Gewächshäusern besteht in der entscheidenden Reduzierung des Energieeinsatzes. Neben den zahlreichen bekannten technischen und verfahrenstechnischen Lösungen, die schwerpunktmäßig auf eine Verbesserung der Wärmedämmung der Gewächshäuser und auf die Einführung neuer energiesparender Kulturtechniken gerichtet sind, lassen sich Lösungen ableiten, die allein durch Verbesserung der Fahrweise der in den Gewächshäusern vorhandenen Klimatisierungseinrichtungen einen wirksamen Beitrag zur Reduzierung des Wärme- und Elektroenergieverbrauchs ermöglichen.

Ausgehend von grundlegenden Überlegungen zur Wärmeversorgung von Gewächshäusern werden mit dem vorliegenden Beitrag eine allgemeingültige Lösung zur ener-

giewirtschaftlichen Fahrweise von Heizungs- und Lüftungssystemen vorgestellt sowie erste Ergebnisse für Gewächshäuser EG 5 dargestellt.

2. Lösungsgrundlagen

2.1. Vorlauftemperaturregelung

Im Sinne einer energiewirtschaftlich optimalen Fahrweise der Heizungssysteme ist die Vorlauftemperatur in Abhängigkeit von den wirksamen klimatischen, gewächshaus- und prozeßspezifischen Einflußgrößen bedarfsgerecht zu führen. Dazu ist der analytisch beschreibbare Zusammenhang zwischen erforderlicher Vorlauftemperatur t_{vSoll} und den auf den Wärmeversorgungsprozeß wirkenden Einflußgrößen herzustellen. Grundlage bilden dabei die bekannten Berechnungsgleichungen zur Ermittlung des sich im Gewächshaus einstellenden Temperaturniveaus [1]:

$$t_i = t_{aStr.} + K_{i,v} (t_v - t_{aStr.}) \quad (1)$$

$$t_{aStr.} = t_a + \frac{D\epsilon}{k' f_A} E_a \quad (1a)$$

$$k_{i,v} = \frac{1}{1 + \frac{k' A_0}{k_H A_H} + 0,5 \frac{k' A_0}{c_w \dot{m}_w}} \quad (1b)$$

Aus Gl. (1) erhält man:

$$t_v = t_i + \left(\frac{1 - K_{i,v}}{K_{i,v}} \right) \left(t_i - t_a - \frac{D\epsilon}{k' f_A} E_a \right) \quad (2)$$

Der Wärmeverbrauchs-koeffizient k' des Gewächshauses wird als windabhängige Größe

$$k' = k'_0 + a_1 w \quad (3)$$

ausgedrückt, so daß nach weiterer Bearbeitung von Gl. (2) die direkte Abhängigkeit des Sollwertes der Vorlauftemperatur von allen Einflußgrößen entsprechend Gl. (4) ausgedrückt werden kann:

$$t_{vSoll} = t_{iSoll} + \left(\frac{A_0}{k_H A_H} + 0,5 \frac{A_0}{c_w \dot{m}_w} \right) \left[(t_{iSoll} - t_a) (k'_0 + a_1 w) - E_a \frac{D\epsilon}{f_A} \right] \quad (4)$$

Mit Gl. (4) steht eine allgemeingültige Beziehung zur Verfügung, die den jeweiligen konkreten Anwendungsbedingungen angepaßt werden muß.

Bei kombinierten Rohr-/Luftheizungen sollte das Heizleistungspotential der Rohrheizung im Bedarfsfall immer vollständig ausgeschöpft werden, um durch Minimierung der Inanspruchnahme der Lufttheizer zusätzlich Elektroenergie einzusparen.

Man erreicht das, indem man die Vorlauftemperatur nach Gl. (4) so regelt, als wäre die notwendige Heizleistung zur Wärmeversorgung des Gewächshauses allein durch die

Rohrheizung aufzubringen. Demzufolge wird in Gl. (4) nicht die spezifische Heizflächenleistung $k_H A_H$ der kombinierten Rohr-/Luftheizung, sondern die der Rohrheizung verwendet. Mit der Überführung des dargelegten Prinzips der Vorlauftemperaturregelung in ein mikrorechnergestütztes Prozeßleitsystem zur Gewächshausautomatisierung kann der Wärmeversorgungsprozeß unter Berücksichtigung folgender wesentlicher Klimagrößen in flexibler und bedarfsgerechter Weise erfolgen:

- Außentemperatur
- Globalstrahlung
- Windgeschwindigkeit.

Die gewächshaus- und heizungsspezifischen Parameter sind unter den konkreten Standort- und Anlagenbedingungen zu ermitteln und als Festwerte in Gl. (4) einzuführen.

2.2. Fahrweise

des Heizungs- und Lüftungssystems

Auf der Grundlage des im Abschn. 2.1. erläuterten Prinzips der Vorlauftemperaturregelung wurde eine Strategie der Fahrweise des Heizungs- und Lüftungssystems erarbeitet, deren Anwendung eine wirtschaftliche Betriebsweise von Gewächshäusern sowohl aus wärmeenergetischer als auch aus elektroenergetischer Sicht zuläßt. Die Grundstruktur der Regelstrategie mit ihren ausführbaren Schalt- und Betriebszuständen zeigt Bild 1. Aus der Grundstruktur leitet sich ein umfangreicher Arbeitsalgorithmus ab, aus dem die Verknüpfung und das Zusammenspiel aller wirkenden Elemente der Fahrweise des Heizungs- und Lüftungssystems beschreibbar ist und der gleichzeitig die Voraussetzung für eine rechen-technische Umsetzung der Regelstrategie bildet. Die Abarbeitung des Algorithmus wird in seinen wesentlichen Funktionen nachfolgend beschrieben.

Nach dem Start des Programmablaufs werden über die Kommunikationseinheit des Prozeßleitsystems zunächst alle notwendigen Eingangsinformationen in bezug auf das zu fahrende Temperaturregime eingegeben. Über die Meßstellen des Prozeßleitsystems werden die aktuellen prozeßspezifischen Führungsgrößen aus Mittlungsintervallen in digitalisierter Aufbereitung in den Algorithmus übernommen. Aus der Meßgröße „Globalstrahlung“ legt das Prozeßleitsystem das zu fahrende Temperaturregime fest:

- $t_{iSoll, Tag, hell}$
- $t_{iSoll, Tag, trüb}$
- $t_{iSoll, Nacht}$

Unabhängig von der globalstrahlungsabhängigen Schaltung der Temperaturregime kann in Zusammenhang mit der Vorgabe von Absatzstufen eine Reduzierung der Sollwerttemperatur bis auf eine pflanzenbaulich zulässige Minimaltemperatur vorgenommen werden. Dieses Sonderregime kann bei begrenztem Energiebezug, z. B. in Spitzenbelastungszeiten, gefahren werden.

In den nachfolgenden Fragezyklen wird zunächst die Einhaltung des zulässigen Inter-

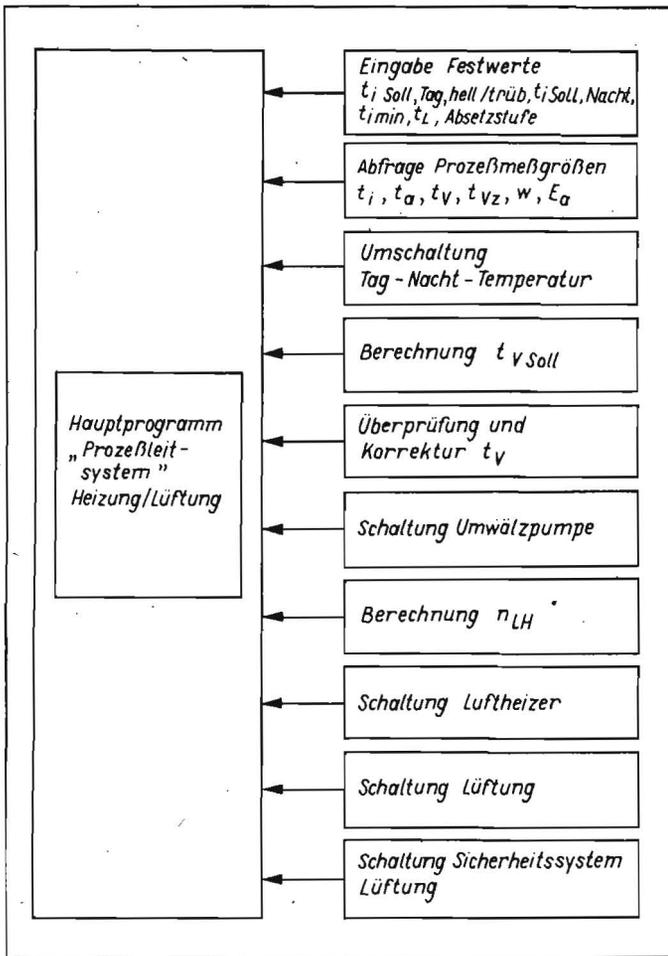


Bild 1 Grundstruktur der Regelstrategie zur mikrorechnergestützten Fahrweise von Heizungs- und Lüftungssystemen in Gewächshäusern

berücksichtigt. Kann durch die Rohrheizung allein der untere Grenzwert des zulässigen Intervalls des Sollwertes der Innentemperatur nicht gehalten werden, ist eine Zuschaltung der Luftheizer erforderlich. Die Zuschaltung der Luftheizer erfolgt bedarfsgerecht, indem durch ein entsprechendes Unterprogramm die notwendige Luftheizeranzahl durch das Prozeßleitsystem selbst errechnet wird. Ausgangspunkt ist dabei der momentane Heizleistungsbedarf des Gewächshauses, der aus den aktuellen Prozeßmeßgrößen resultiert:

$$\dot{Q}_{\text{Soll}} = k' f_A A_G (t_{\text{isoll}} - t_A) - \epsilon D A_G E_a \quad (5)$$

Aus dem Heizleistungsbedarf und der an der Rohrheizung anliegenden Heizleistung

$$\dot{Q}_{\text{RH}} = \frac{(k_H A_H)_{\text{RH}}}{1 + \frac{0,5 (k_H A_H)_{\text{RH}}}{c_w \dot{m}_w}} (t_v - t_i) \quad (6)$$

ergibt sich als Differenzbetrag der durch die Luftheizer insgesamt aufzubringende Leistungsanteil.

Analog zu Gl. (6) berechnet das Prozeßleitsystem die an einem Einzelluftheizer zur Verfügung stehende Heizleistung und legt daraus die notwendige Anzahl zuzuschaltender Luftheizer fest:

$$n_{\text{LH}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Soll}} - \dot{Q}_{\text{RH}}}{\dot{Q}_{\text{LH1}}} \quad (7)$$

Damit können der Luftheizerbetrieb auf eine objektiv notwendige Größenordnung beschränkt und Elektroenergie eingespart werden. Aus praktischen Erwägungen können auch einzelne Luftheizer zusammengefaßt und gruppenweise betrieben werden.

Bei Überschreitung des Sollwertintervalls der Innentemperatur um einen festgelegten Betrag wird durch das Schließen des Motorventils die äußere Wärmezufuhr aus dem Wärmenetz unterbrochen. Gleichzeitig wird im Gewächshaus die Umwälzpumpe des Heizungssystems abgeschaltet. Steigt die Innentemperatur durch Globalstrahlungseinfluß

valls des Sollwertes der Innentemperatur überprüft. Bei Unter- bzw. Überschreitung des Intervalls erfolgt i. allg. aus den aktuellen Prozeßmeßgrößen eine Neuberechnung des Sollwertes der Vorlauftemperatur entsprechend Gl. (4). Die momentan anliegende Vorlauftemperatur wird mit der Neuberechneten und damit für den Wärmeversorgungsprozeß erforderlichen Vorlauftemperatur verglichen und bei Abweichung von einem festgelegten Toleranzbereich durch Ansteuerung

eines Motorventils nach dem Prinzip der Rücklaufbeimischung korrigiert.

Bei der Überprüfung und Korrektur der Vorlauftemperatur werden die Sonderfälle, daß durch die Temperaturbegrenzung des Heizungssystems auf die Auslegungstemperatur dieser Temperaturbereich nicht überschritten werden kann sowie die im Gewächshaus geforderte Vorlauftemperatur weiterhin durch die vom Heizwerk zentral bereitgestellte Vorlauftemperatur begrenzt ist, mit

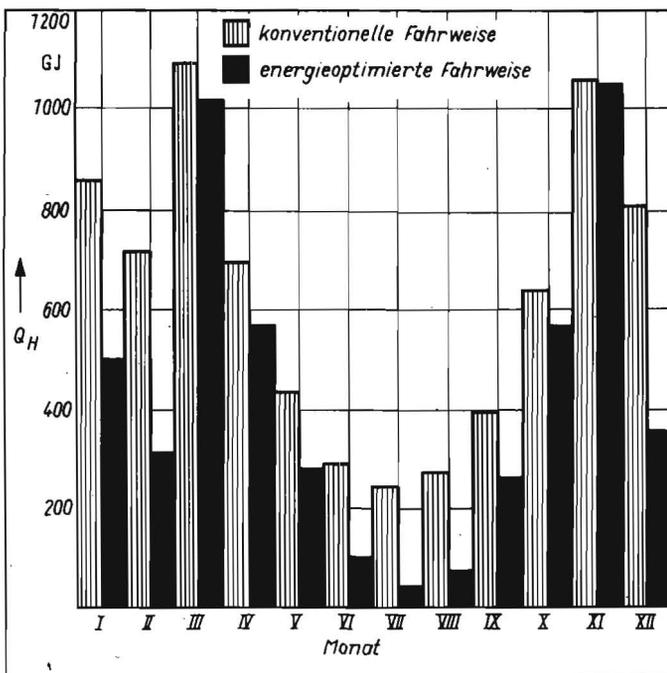


Bild 2. Jahresgang des Wärmeverbrauchs eines Gewächshauses EG 5 ($A_G = 3600 \text{ m}^2$)

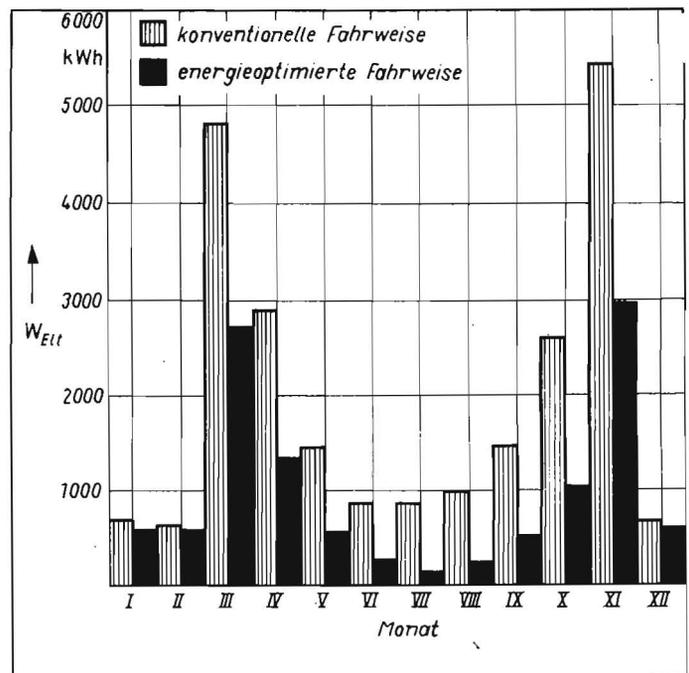


Bild 3. Jahresgang des Elektroenergieverbrauchs eines Gewächshauses EG 5 ($A_G = 3600 \text{ m}^2$)

bis auf den Grenzwert der Lüftungstemperatur, wird das Lüftungssystem in mehreren Abstufungen aktiviert und durch ständige Rückfrage zur sich einstellenden Innentemperatur die notwendige Arbeitsstellung der Lüftungskappen festgelegt. Über die Prozeßmeßstelle „Windgeschwindigkeit“ erfolgt bei Überschreitung eines kritischen Grenzwertes der Windgeschwindigkeit eine Zwangsschließung des Lüftungssystems.

3. Ergebnisse und Effektivität der Lösung

Bei Übertragung des Lösungsprinzips auf praxishere Anwendungen können Aussagen über die zu erwartende Effektivität gegenüber einem vorliegenden Ausgangszustand der Fahrweise von Heizungs- und Lüftungssystemen getroffen werden. Dazu wurden am Beispiel von Gewächshäusern EG 5 im VEG Gartenbau Rostock vergleichende Untersuchungen zu einem konventionellen Regelungssystem auf der Basis von elektromagnetischen Tastbügelreglern durchgeführt [2]. Als energiewirtschaftlich besonders nachteilig haben sich bei der Fahrweise mit dem konventionellen System folgende Mängel ergeben:

- ungenügende Anpassung der Regelcharakteristik der Vorlauftemperatur an den Wärmeversorgungsprozeß der Gewächshäuser
- ausschließlich außentemperaturabhängige Führung der Vorlauftemperatur
- hoher Grad der Inanspruchnahme der

Luftheizer.

Mit der erarbeiteten Lösung können o. g. Mängel ausgeschaltet und zusätzlich energetisch vorteilhafte Betriebsbedingungen geschaffen werden. Von besonderem Wert ist dabei die durch Minimierung der Inanspruchnahme der Luftheizer und die durch Schaltung der Umwälzpumpe des Heizungssystems erreichbare Elektroenergieeinsparung. Unter Zugrundelegung einer typischen Jahresanbaufolge (Jan./Febr./Dez.: Frostfreiheit, März bis Nov.: Gurke/Tomate) wurden für die spezifischen Standortbedingungen des VEG Gartenbau Rostock am Beispiel eines Gewächshauses EG 5 ($A_G = 3600 \text{ m}^2$) die Jahresgänge des Wärme- und Elektroenergieverbrauchs vergleichend für beide Fahrweisen berechnet (Bilder 2 und 3). In der Jahresgesamtbilanz ergeben sich die in Tafel 1 zusammengefaßten Ergebnisse.

4. Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde ausgehend von grundlegenden Überlegungen zur energiewirtschaftlichen Fahrweise von Heizungs- und Lüftungssystemen in Gewächshäusern eine rechnergestützte Lösung vorgestellt, die in ihrer Anwendung als Rationalisierungslösung bedeutsame Einsparungen an Wärme- und Elektroenergie ermöglicht. Das Kernstück der technischen Lösung besteht in der bedarfsgerechten Führung der Vorlauftemperatur und in einem sich daraus ableitenden Arbeitsalgorithmus. Die erreichbaren Einsparungen an Wärme- und Elektroenergie wer-

Tafel 1. Jahresgesamtbilanz des Wärme- und Elektroenergieverbrauchs eines Gewächshauses EG 5 ($A_G = 3600 \text{ m}^2$)

Bewertungsgrößen	konventionelle Fahrweise		energieoptimierte Fahrweise	
Jahresverbrauch an Wärmeenergie	GJ	7494	5125	
Jahresverbrauch an Elektroenergie davon	kWh	23330	11446	
- Luftheizer	kWh	15181	5905	
- Umwälzpumpe	kWh	8149	5541	

den vom technischen Niveau des Ausgangszustands der Fahrweise der Heizungs- und Lüftungssysteme in der jeweiligen Gewächshausanlage bestimmt.

Literatur

- [1] Bathke, K.; Hamann, R.: Wärmetechnische Grundlagen und Empfehlungen für eine rationelle Energieanwendung in Gewächshausanlagen. Internationale Gartenbauausstellung der DDR, Erfurt, iga-Ratgeber 1980.
- [2] Bookholdt, M.: Technisch-technologische Lösungen zur energieoptimalen Betriebsweise von Gewächshäusern am Standort Rostock-Marienehe. Forschungszentrum für Mechanisierung und Energieanwendung in der Landwirtschaft Schlieben, Bericht 1988. A 5571

Nutzung der Abwärme aus Gerätehäusern von Zusatzbelichtungssystemen

Dr.-Ing. M. Bookholdt

Forschungszentrum für Mechanisierung und Energieanwendung in der Landwirtschaft Schlieben der AdL der DDR

Verwendete Formelzeichen

A_o	m^2	Oberfläche des Gerätehauses
	$\text{Wh}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	spezifische Wärmekapazität der Luft
κ	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Wärmedurchgangszahl des Gerätehauses
κ_R	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	Wärmedurchgangszahl der unterirdischen Zu- und Abluftkanäle
L	m	Länge der unterirdischen Kanäle
\dot{Q}_{Dr}	kW	Wärmeleistung der Vorschaltgeräte
\dot{Q}_L	kW	Lüftungswärmeleistung
\dot{Q}_T	kW	Transmissionswärmeleistung
\dot{Q}_V	kW	Wärmeverlustleistung
t_a	$^\circ\text{C}$	Außenlufttemperatur
t_g	$^\circ\text{C}$	Grundwassertemperatur
t_{Dr}	$^\circ\text{C}$	Gerätehausinnentemperatur
t_{GH}	$^\circ\text{C}$	Gewächshausinnentemperatur
V_L	m^3/h	Luftdurchsatz
Δt_{NA}	K	Nenntemperaturdifferenz für Lüfterausschaltung
Δt_{NE}	K	Nenntemperaturdifferenz für Lüftereinschaltung
ρ_L	kg/m^3	Dichte der Luft

1. Problemstellung

Mit der Erschließung und Anwendung von Niedertemperaturabwärme ergeben sich in der Gewächshauswirtschaft volkswirtschaftlich bedeutsame Möglichkeiten, wertvolle Primärenergieträger für den Prozeß der Wär-

meversorgung zu substituieren und einzusparen. National und international werden zunehmend Bemühungen deutlich, alle in ihrer Vielseitigkeit zur Verfügung stehenden niederthermalen Wärmequellen in größerem Umfang als bisher nutzbar zu machen.

In spezialisierten Gewächshausbetrieben ergeben sich als prozeßeigene Abwärmequellen die bei der Jungpflanzenanzucht eingesetzten Zusatzbelichtungssysteme. Neben der Wärmeabgabe der Lampen fällt durch die Verlustleistung der Vorschaltgeräte technisch nutzbare Abwärme an.

Mit dem vorliegenden Beitrag werden eine Lösungsvariante für die Rückgewinnung und Anwendung von Abwärme aus derartigen Systemen am Beispiel von Gewächshäusern EG 5 im VEG Gartenbau Rostock dargestellt und erste Erfahrungen einer Praxiserprobung mitgeteilt.

2. Charakteristik der Abwärmequelle

Im VEG Gartenbau Rostock wird die Zusatzbelichtung auf der Grundlage von Halogen-Metaldampflampen NC 1000 realisiert. Aus technisch-technologischen Gründen sind die Vorschaltgeräte 1/2 VMHD1000 in speziellen massiven Schalt- und Gerätehäusern außerhalb der Gewächshäuser installiert (Bild 1).

Bedingt durch ohmsche Verluste und Umma-

gnetisierungsverluste wird durch jedes Vorschaltgerät nach Herstellerangaben eine Wärmeleistung von etwa 60 W abgegeben. Entsprechend dem Projekt können in den Jungpflanzenanzuchthäusern des VEG Gartenbau Rostock maximal 240 Lampen je Gewächshaus gleichzeitig betrieben werden, so daß damit eine Wärmeleistung von 14,4 kW erzeugt wird. Zur Abführung der in den Gerätehäusern entstehenden Wärme dienen Dachventilatoren, die zur Kühlung der Vorschaltgeräte gleichzeitig über Wandöffnungen Außenluft ansaugen.

3. Technische Lösung der Abwärmenutzung

3.1. Lösungsprinzip

Die Lösung zur Nutzung der Abwärme beruht auf einem Umluftsystem zwischen Gerätehaus und Gewächshaus, das Gewächshausluft über eine Zuluftleitung in das Gerätehaus fördert und nach Erwärmung über eine Abluftleitung in das Gewächshaus zurückführt. Die Grundlage für das Umluftsystem bilden zwei vorhandene unterirdische Verbindungskanäle zwischen Gerätehaus und Gewächshaus, die die Elektrokabel der Lampensysteme aufnehmen. Die Verbindungskanäle münden gewächshausseitig ebenerdig in je einem gemauerten Kabelschacht. Die not-