

# Modellierung der relativen Energieeffizienz multivalenter Wärmeversorgungsanlagen von Gewächshäusern

Thomas Rath

DGG-Proceedings, Vol. 3, May 2013, No. 8, p. 1-5.

DOI: 10.5288/dgg-pr-03-08-tr-2013

Corresponding Author:

Thomas Rath

Biosystems Engineering Section

Leibniz Universität Hannover

Germany

Email: [rath@bgt.uni-hannover.de](mailto:rath@bgt.uni-hannover.de)

---

DGG-Proceedings

Short Communications (peer reviewed, open access)

German Society of Horticultural Sciences (DGG)

[www.dgg-online.org](http://www.dgg-online.org)

## **Modellierung der relativen Energieeffizienz multivalenter Wärmeversorgungsanlagen von Gewächshäusern**

Thomas Rath

Fachgebiet Biosystem- und Gartenbautechnik, Leibniz Universität Hannover, Germany

### **1. Einleitung, Stand des Wissens, Zielsetzung**

Eine Bewertung des geschützten Anbaus unter Glas ist maßgeblich von der Effizienz der eingesetzten Energie abhängig. Dabei müssen Systeminput (Energie) und Systemoutput (Produkt) in Beziehung gesetzt werden (van der Velden und Verhaegh, 1992). Für viele Systeme (besonders für neue Anlagenkonzepte) liegen zwar Studien zur Energiebewertung von technischer Seite vor (z.B. Ozgener und Hepbasli, 2004), eine genaue Definition des Begriffes Energieeffizienz existiert dabei jedoch bis zum heutigen Zeitpunkt ebenso wenig, wie die für die Effizienzbestimmung notwendigen Modelle. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, ein Berechnungsmodell zur Bewertung der relativen Energieeffizienz multivalenter Gewächshausheizungssysteme zu entwickeln und Kernaussagen bzgl. der Systeme daraus abzuleiten.

### **2. Material und Methoden**

#### Betriebsdaten

Modellentwicklung und Berechnungen erfolgten an zwei Fallbeispielen aus der gartenbaulichen Praxis. Es wurden Gartenbaubetriebe ausgewählt, bei denen die Heizenergieversorgung sowohl wärmegeführte (Erdgas), stromgeführte (BHKW) als auch CO<sub>2</sub>-geführte (Erdgas) Komponenten beinhalteten. Die Betriebskennzahlen (Heizanlagen, Gewächshäuser, Kultursysteme, Temperatur- und CO<sub>2</sub>-Regelung etc.) wurden jeweils vor Ort aufgenommen, mit den Betriebsleitern abgeglichen und anschließend parametrisiert. Die im Ergebnisteil aufgeführten Simulationsergebnisse beziehen sich auf einen der beiden Betriebe mit 40000 m<sup>2</sup> Unter Glasfläche und einer Ganzjahres-Gurkenproduktion.

#### Modellierungsansatz

Die Effizienzberechnung wurde durch die Simulation der im Laufe eines Jahres aufgewendeten Energie zum produzierten Ertrag ermittelt. Dabei kamen stündliche Zeitschritte zum Einsatz, wobei Basisdaten für den Gewächshausenergieverbrauch mit dem Softwaresystem HORTEx 3.0 (Rath, 2011) berechnet wurden. Als Außenwitterung wurden stündliche Daten eines Testreferenzjahres für Nordwestdeutschland eingesetzt (Rath, 2011). Als Systemgrenze wurde der physikalische Gartenbaubetrieb definiert. Die relative Energieeffizienz einer Anlage  $rE_{Anl}$  wurde mit

$$rE_{Anl} = E_{Anl} / E_{Vergl}$$

**E = produzierte Biomasse / (Systemenergieinput – Systemenergieoutput)**

berechnet ( $E$  in  $\text{kg/m}^2$  pro  $\text{kWh/m}^2$ ,  $rE$  dimensionslos,  $Anl = \text{Anlage}$ ,  $Vergl = \text{Vergleichsanlage}$  mit  $rE = 1$ ). In Tab. 1 und 2 und Abb. 1 kennzeichnen somit die Werte  $rE = 1$  immer die Bezugsanlagen, mit denen verglichen wurde. Die Vereinheitlichung aller energetischen Inputs erfolgte auf thermischen Kilowattstunden. Die Umrechnung von eingesetzter Erdgasmenge auf Kilowattstunden erfolgte mit dem Faktor  $11,48 \text{ kWh/m}^3$  (Domke 2009). Die Umwandlung von thermischer Energie auf elektrische Energie (und umgekehrt) erfolgte auf der Grundlage des dt. Kraftwerkmixes mit dem Faktor  $0,42$  (UBA, 2011). Die Berechnung der bei der Verbrennung erzeugten und nutzbaren  $\text{CO}_2$ -Menge erfolgte mit praxisnahen stöchiometrischen Standardwerten (Domke 2009). Bei Strom als Systemoutput wurde zuerst auf Wärme umgerechnet und anschließend der Systeminput entsprechend reduziert (siehe Gl. 1).

#### Modellierung der Heizenergiebereitstellung

Die Modellierung der Heizungskesselanlage erfolgte auf Basis des Systems HORTEX (Rath, 2011). Die Kalkulation der mit Pufferspeichern abspeicherbaren und wieder nutzbaren Wärmeenergie erfolgte durch Berechnung der Lade- und Entladevorgänge auf Stundenbasis mit einer maximalen Temperaturspreizung der Speicher von  $50 \text{ K}$  und einem sehr gut isolierten System (keine Speicherverluste bei Tag/Nachtspeicherung). Überschüssige Energie wurde im Pufferspeicher zwischengespeichert und möglichst zeitnah bei Energieansprüchen des Systems wieder an das Heizungssystem abgegeben. Der elektrische Zusatzenergiebedarf wurde mit dem existierenden Standardfaktor von  $0,0238$  mal der Wärmeenergie eingerechnet (siehe auch HORTEX; Rath, 2011).

Für BHKWs wurde ein thermischer Wirkungsgrad von  $50 \%$  und ein elektrischer Wirkungsgrad von  $40 \%$  (Gesamtwirkungsgrad  $90 \%$ ) (siehe ASUE, 2011) und  $1 \%$  Strombedarf vom Wärmenutzen (Rath, 2011) angesetzt. Die Wärmenutzung wurde jeweils in die Grundlast mit eingebunden. Der Betrieb der BHKWs erfolgte entweder nach Wärme- oder Stromführung. Da im Teillastbetrieb der Wirkungsgrad eines BHKWs deutlich verringert ist, schaltete bei Wärme- oder Stromführung das BHKW ab, wenn die Heizleistung der Gewächshäuser plus Ladeleistung des Pufferspeichers niedriger als  $60 \%$  der Nennleistung des BHKWs waren (siehe ASUE 2011). Das  $\text{CO}_2$  aus den Abgasen wurde bei Bedarf zur Düngung eingesetzt. Überschüssige Energie wurde, wenn der Pufferspeicherstatus es zuließ, zwischengespeichert. Bei einer BHKW-Führung nach Strombedarf wurde das BHKW so betrieben, dass möglichst hohe Laufzeiten zur Stromerzeugung entstanden. Es erfolgte keine Nutzung des BHKW-Abgas- $\text{CO}_2$  zur Düngung. Die durch BHKWs erzeugte elektrische Energie wurde hinsichtlich ihrer Wertigkeit auf Wärmeenergie umgerechnet und vom Systeminput abgezogen.

#### Modellierung des Ertrages

Zur Modellierung des Ertrages wurden die Ergebnisse langjähriger Gurkenversuche herangezogen (Lattauschke, 2010). Der Ertrag wurde mit  $180$  Gurken pro  $\text{m}^2$  und mit  $500 \text{ g}$  pro Gurke pauschaliert. Die Abhängigkeit des Ertrages vom  $\text{CO}_2$ -Gehalt des Gewächshauses wurde durch einen bei Krug (1986, S. 184) dokumentierten Ansatz beschrieben. Dort wird der  $\text{CO}_2$ -Kompensationspunkt bei  $75 \text{ vpm}$  fixiert und das ökologische Optimum in einem weiten Bereich von  $1000 \text{ vpm}$  bis über  $2000 \text{ vpm}$  definiert, wobei ab  $1000 \text{ vpm}$  kein Ertragszuwachs mehr vorhanden ist. Für die Berechnungen wurde daher mit einem linearen Ertragszuwachs zwischen dem Kompensationspunkt (kein Ertrag) und dem minimalen ökologischen Optimum ( $1000 \text{ vpm} = \text{Vollertrag}$ ) gerechnet.

### Modellierung des CO<sub>2</sub>-Bedarfs

Der für die Regelung von CO<sub>2</sub>-geführten Heizanlagenkomponenten zugrunde gelegte CO<sub>2</sub>-Bedarf wurde aus den bei den jeweiligen CO<sub>2</sub>-Sollwerten erzeugbaren Biomassen und dem durch Luftwechsel resultierenden CO<sub>2</sub>-Austausch mit der Außenatmosphäre (370 vpm) für jede Stunde des Jahres unter Berücksichtigung der im Betrieb eingesetzten CO<sub>2</sub>- und Lüftungsregelstrategien bestimmt. Hierzu wurde der Anteil der Gurken an der Gesamtfrischmasse mit 75 % und der Wurzelmasse mit 5 % angenommen. Unter Berücksichtigung von 90 % Wasseranteil (Krug, 1986) konnte mit der Standardphotosynthesegleichung (Output: C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) und den entsprechenden Molekular- und Atomgewichten das in der produzierten Biomasse fixierte CO<sub>2</sub> kalkuliert werden.

Die Berechnung der zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Verluste durch den Luftwechsel im Gewächshaus wurde mit Hilfe eines erstellten Luftwechselmodells basierend auf den Messungen von Baytorun (1986) und den aus den geometrischen Abmessungen berechenbaren Gewächshausvolumina durchgeführt. Mittels der aus den HORTEx-Berechnungen resultierenden Innentemperaturen und den Vorgaben des Betriebes (Sollwerten) wurden so für jede Stunde des Jahres Lüftungsöffnung, Luftwechsel durch Undichtigkeiten und Lüftung und daraus resultierend der CO<sub>2</sub>-Verlust, die CO<sub>2</sub>-Innenkonzentration und der CO<sub>2</sub>-Bedarf berechnet. Bei den Simulationen wurde zugrunde gelegt, dass das in der Nacht durch Atmung produzierte CO<sub>2</sub> am Tage der Photosynthese wieder zur Verfügung steht.

### **3. Ergebnisse**

Mit den beschriebenen Modellansätzen wurden die Energieeffizienzen der Heizversorgungsanlage des Fallbeispiels mit verschiedenen Anlagenvarianten simuliert. Tab. 1 gibt die Ergebnisse für eine konventionelle Gas-Kesselanlage in Kombination mit BHKW und Pufferspeicher wieder. Der Gaskessel wurde entweder strikt nach der anfallenden Wärmeleistung modulierend gesteuert oder wurde nach dem anfallenden CO<sub>2</sub>-Bedarf geregelt. Es wird deutlich, dass allein der Einsatz eines BHKWs die Energieeffizienz der gesamten Heizenergieanlage aufgrund der besseren Nutzung der Wärmeenergie (im Vergleich zum bundesdeutschen Verstromungswirkungsgrad) um bis zu 50 % steigert. Wird das System zusätzlich auf die Nutzung des Abgas-CO<sub>2</sub> zur Düngung optimiert, erfolgt eine weitere Energieeffizienzsteigerung durch resultierende Ertragssteigerungen auf bis zu 222 %. Der Einsatz eines Pufferspeichers verbesserte die Anlageneffizienzen in der Regel um weitere 44 %. Eine genauere Analyse der für multivalente Systeme wichtigen Pufferspeicher ergibt sich aus Simulationen für unterschiedliche Speichervolumina (siehe Abb. 1). Um allgemeingültige Aussagen zu erzeugen, wurde das Pufferspeichervolumen auf die installierte Wärmeleistung des Kessels bezogen. Abb. 1 verdeutlicht, dass ab einer Pufferspeichergröße von 150 L/kW keine wesentlichen Energieeffizienzsteigerungen mehr zu erwarten sind.

Wichtig bei der Analyse der Energieeffizienzen ist die Tatsache, dass die Ergebnisse wesentlich von den gewählten Bezugsgrößen abhängen (siehe Simulationsergebnisse in Tab. 2). Es wird deutlich, dass die quantitative Bewertung der Energieeffizienz von gartenbaulichen Wärmeversorgungsanlagen nur auf der Basis der erzielten Erträge bzw. den damit zu erzeugenden Erlösen erfolgen kann. Dies ist bei den hier vorgestellten

Simulationen besonders wichtig, da das bei der Wärmeerzeugung anfallende Abfallprodukt CO<sub>2</sub> die Produktionsmenge maßgeblich beeinflusst.

Tab. 1: Energieeffizienzen verschiedener Wärmeversorgungssysteme

Simuliertes System	rel. Energieeffizienz (-)
Erdgas-Anlage (wärmegeführt*)	1,00
Erdgas-Anlage (CO <sub>2</sub> -geführt**)	1,49
Erdgas-Anlage (CO <sub>2</sub> -geführt**) + BHKW (wärmegeführt*)	2,22
Erdgas-Anlage (CO <sub>2</sub> -geführt**) + BHKW (wärmegeführt*) + Pufferspeicher	2,66

\* wärmegeführt, ohne CO<sub>2</sub>-Abgasnutzung \*\* wärmegeführt, plus Nutzung der CO<sub>2</sub>-Abgase

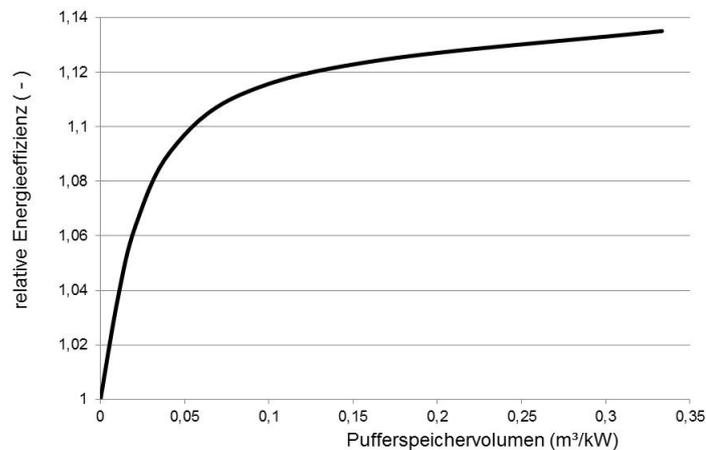


Abbildung 1: Relative Energieeffizienzen bei unterschiedlich großen Pufferspeichern

Tab. 2: Relative Energieeffizienz bei verschiedenen Bezugssystemen

Betriebsweise	Bezugssystem	rel. Energieeffizienz (-)
wärmegeführt*	erzeugte Wärme (kWh)	1,53
CO <sub>2</sub> -geführt**	erzeugte Wärme (kWh)	1,00
wärmegeführt*	erzeugtes Produkt (kg Gurke)	0,67
CO <sub>2</sub> -geführt**	erzeugtes Produkt (kg Gurke)	1,00

\* Erdgas-Anlage, wärmegeführt, ohne CO<sub>2</sub>-Abgasnutzung \*\* Erdgasanlage, wärmegeführt, Nutzung der CO<sub>2</sub>-Abgase

#### 4. Diskussion

Multivalente Heizenergieanlagen im Gartenbau, die Wärme als Koppelprodukte anderer Energiesysteme (z.B. Stromerzeuger) oder Koppel- bzw. Abfallprodukte (CO<sub>2</sub>) der Wärmeerzeugung zur Ertragssteigerung in den Produktionsprozess einbringen, konnten in

den Simulationen die Energieeffizienz von Gesamtanlagen verdoppeln. Berechnungen mit dem gleichen Modellansatz in einem weiteren Fallbeispiel erzeugten ähnliche Aussagen (Ergebnisse nicht dargestellt), so dass hier eine gewisse Verallgemeinerung der Aussagen möglich erscheint. Der Einsatz von technischem CO<sub>2</sub> konnte jedoch nicht in die Bewertung mit einbezogen werden, da keine Betriebsdaten hierzu vorlagen. Ebenso erfolgte keine monetäre Bewertung etwaiger Produktqualitätsunterschiede, da monetäre Bewertungen generell die Preisschwankungen des Marktes beinhalten, die mit der reinen Energieeffizienz der Anlage nicht in kausalem Zusammenhang stehen.

## 5. Schlussfolgerung

Aus den vorliegenden Daten und Berechnungen können folgende verallgemeinernde Schlussfolgerungen gezogen werden: (I) relative Energieeffizienzberechnungen von Gewächshausanlagen müssen neben der Heizenergie auch die Systemoutputs Erträge und elektr. Energie berücksichtigen. (II) Pufferspeicher erhöhen die Energieeffizienzen in nicht-wärmegeführten multivalenten Heizanlagen um bis 20 %. (III) Mit CO<sub>2</sub>-geführten Wärmeversorgungsanlagen können Energieeffizienzen um 50 % gesteigert werden. (III) Der Einsatz von Blockheizkraftwerken erhöht die Energieeffizienz von Wärmeversorgungsanlagen im Gartenbau um ca. 30 %. Allgemein hängen die Ergebnisse stark von den Bezugsgrößen und gewählten Vergleichsanlagen ab. Ebenso spielt die Qualität der verwendeten technischen und biologischen Modellansätze eine wesentliche Rolle. So führt z.B. eine 20-prozentige Überschätzung des Ertrags der Vergleichsanlage unmittelbaren zu einer Reduktion der rel. Energieeffizienz um 25 %.

## 6. Literatur

- ASUE (2011): BHKW-Kenndaten 2011. Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Berlin.
- BAYTORUN A.N. (1986): Bestimmung des Luftwechsels bei gelüfteten Gewächshäusern. Gartenbautechnische Informationen, Heft 27. Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover.
- DOMKE O. (2009): Erdgas in Gärtnereien. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft. Wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft, Bonn.
- KRUG H. (1986): Gemüseproduktion. Verlag Parey, Berlin, Hamburg.
- LATTUSCHKE G. (2010): Anbau von Gurken auf Substrat am hohen Draht. Heft 11/2010. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Freistaat Sachsen, Dresden.
- OZGENER O., HEPBASLI A. (2005): Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system. Energy and Buildings, 37 (1), 101-110.
- RATH T. (2011): HORTEX 3.0 (c). Softwaresystem zur Planung von Heizanlagen von Gewächshäusern. Fachgebiet Biosystem- und Gartenbautechnik, Leibniz Universität Hannover. [www.bgt-hannover.de](http://www.bgt-hannover.de).
- UBA (2011): Daten zur Umwelt, Energieeffizienz bei der Stromerzeugung. Umweltbundesamt, Dessau. [www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de](http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de)
- VAN D. VELDEN N.J.A., VERHAEGH A.P. (1992): Economic aspects of greenhouse horticulture; energy efficiency and CO<sub>2</sub>-emission in the Dutch greenhouse industry. Acta Horticulturae, 312, 87-94.