



DGG-Proceedings

Vol. 1, 2011

Short Communications - Annual Conference DGG and BHGL
23.02. - 26.02.2011, Hannover, Germany
Peer Reviewed

Editorial Board and Review

Balder, Hartmut *Berlin*
Damerow, Lutz *Bonn*
Dirksmeyer, Walter *Braunschweig*
Drüge, Uwe *Erfurt*
Michaelis, Gerlinde *Bad-Zwischenahn*
Rath, Thomas *Hannover*
Schreiner, Monika *Großbeeren*
Schuster, Mirko *Dresden*
Winkelmann, Traud *Hannover*

German Society of Horticultural Sciences (DGG)
Herrenhäuser Str. 2
30419 Hannover
Germany

© DGG, 2011

DGG-Proceedings, Vol. 1, No. 10, 1-5. DOI: 10.5288/dgg-pr-01-10-is-2011

Ingo Schuch*, Dennis Dannehl, Thorsten Rocksch, Raquel Salazar Moreno,
Abraham Rojano Aguilar, Uwe Schmidt

Das geschlossene Solarkollektorgewächshaus – Anlagenkonzept und energetische
Untersuchungen zum Wärmeenergiegewinn im Sommer 2010

*Corresponding Author:

Ingo Schuch

Humboldt-Universität zu Berlin,
Fachgebiet Biosystemtechnik
Albrecht-Thaer-Weg 3
14195 Berlin
Germany
Email: ingo.schuch@agrار.hu-berlin.de

Das geschlossene Solarkollektorgewächshaus - Anlagenkonzept und energetische Untersuchungen zum Wärmeenergiegewinn im Sommer 2010

I. Schuch¹, D. Dannehl¹, T. Rockschr¹, R. Salazar Moreno², A. Rojano Aguilar², U. Schmidt¹

¹Humboldt-Universität zu Berlin, Fachgebiet Biosystemtechnik, 14195 Berlin; ²Universidad Autónoma Chapingo, México- Texcoco, CP 56230, Chapingo, Edo. México

1. Einleitung, Stand des Wissens, Zielsetzung

Da Gewächshäuser mit ihrer strahlungsdurchlässigen Konstruktion prinzipiell thermischen Solarkollektoren ähneln, bietet sich eine bivalente Nutzung als Produktionsstätte für Pflanzen und thermischer Solarkollektor an. Hierzu wurden bereits in den 1980er Jahren Lösungsansätze entwickelt, bei denen der Überschuss an eingestrahelter Wärmeenergie über zwangsluftgeführte Wärmetauscher unter den Kulturtischen (Damrath, 1982) oder mittels freier Konvektion an Kühlflächen im Dachraum (Kurtán, 1988) entzogen und in einen oberirdischen Wasserspeicher eingeleitet wurde. Zurzeit wird in einem Ansatz aus den Niederlanden die Luft im geschlossenen betriebenen Gewächshaus durch technische Aufbereitung aktiv gekühlt, entfeuchtet, erwärmt und bei Bedarf mit CO₂ angereichert. Unterirdische Warm-/Kalt-Aquifere fungieren dort zur saisonübergreifenden Speicherung (Opdam et al., 2005).

Das Berliner Teilprojekt im Forschungsverbund ZINEG untersucht mit einem veränderten technischen Konzept der Kühlung und Wärmespeicherung den geschlossenen Betrieb von Gewächshäusern bei Ausnutzung der solaren Überschusswärme und Verwendung von Wärmepumpen. Die in das Gewächshaus eingestrahlte sensible Wärmeenergie sowie die durch die pflanzliche Transpiration entstandenen latenten Wärmeströme sollen mittels Kühl-/Entfeuchtungstechnik, die überwiegend mit natürlicher Konvektion der Luft arbeitet, entzogen und für spätere Heizzwecke in einen oberirdischen Wassertank geleitet werden. In diesem Zusammenhang ist der flexible Wärmepumpeneinsatz für Kühlung und Heizung im geschlossenen Gewächshaus mit möglichst geringen Primärenergieaufwendungen von Bedeutung. Im Fokus der energetischen Untersuchungen des Sommerbetriebs 2010 lagen die Kühl- und Entfeuchtungssysteme sowie der Betrieb des Wärmepumpenaggregats, um insbesondere Fragestellungen zum Kollektorwirkungsgrad und zu den Arbeitszahlen der Wärmepumpe zu beantworten.

2. Material und Methoden

Die Anlage umfasst zwei Venlo-Gewächshäuser (Solarkollektor-, Referenzgewächshaus), welche in Nord-Süd-Ausrichtung und mit einer Firsthöhe von 6,7 m errichtet wurden. Die beiden Häuser verfügen über eine jeweilige Grundfläche von 307 m², wovon je 200 m² als Netto-Anbaufläche für eine hydroponische Tomatenkultur (Sorte 'Pannovy') auf der hohen Pflanzenrinne genutzt werden. Des Weiteren wurden die Gewächshäuser mit jeweils drei Heizungssystemen ausgestattet. Darunter befindet sich eine praxisübliche Fußrohrheizung zur Absicherung der Heizwärmeversorgung bei entladendem Wärmespeicher. Das zweite

Heizungssystem wurde als Luftgebläse mit gelochtem Folienschlauch (Vorlauftemperatur < 50 °C) unter der hohen Kulturrinne verlegt und ein drittes in Form einer mitwachsenden Aluflügelrohrheizung (Vorlauftemperatur < 40 °C) im Bestand platziert. Zudem wurden beide Häuser mit vollautomatischer Nährlösungsbewässerung, einer Begasungsanlage für technisches CO₂, einem praxisüblichen Tagesenergieschirm und einer Fog-Anlage zur Latentkühlung ausgerüstet.

Entgegen der Ausstattung im konventionell betriebenen Referenzgewächshaus befinden sich im Dachraum des Solarkollektorgewächshauses 16 Rippenrohre zur Kühlung und Entfeuchtung mit untergehängter Kondensatsammelrinne sowie ein stark aluminisierter Hüllenergieschirm, welcher an den Stehwänden als Rollschirm ausgeführt wurde. Zudem sind im Kollektorgewächshaus das Schlauchgebläse- und das Aluflügelrohrsystem für Heizung und Kühlung/Entfeuchtung nutzbar. In diesem Zusammenhang ist die spezielle hydraulische Einbindung der Wärmepumpe in das Kollektorsystem von Relevanz, da diese einen flexiblen Heiz-, Kühl- sowie Entfeuchtungsbetrieb ermöglicht. Die dafür verwendete zweistufig arbeitende Wasser/Wasser-Kompressionswärmepumpe (Fa. Climaveneta) hat eine maximale elektrische Anschlussleistung von 40 kW (80 kW Kühlleistung, 110 kW Heizleistung). Zur Absicherung gegen Frostschäden an den Kühlrohren im Dachbereich wurde das hydraulische System mit einem Wasser-Glykol-Gemisch versehen. Für die Wärmeenergiespeicherung wurde außerhalb der Gewächshäuser ein mit 290 m³ Wasser gefüllter, oberirdischer Niedertemperaturspeicher (Arbeitsbereich 7 °C bis 42 °C) errichtet. Dieser basiert auf einem konventionellen Wassertank und wurde zusätzlich mit einer Innenisolierung (30 mm) sowie einem geschlossenen Foliensystem ausgestattet.

Zur Erfassung der Energieströme im Solarkollektorsystem wurden 9 Wärmemengen- und 2 Elektroenergiezähler verbaut. Die auftretenden Massenströme werden mit Kondensat- und Nährlösungsrücklaufmengenzählern aufgezeichnet. Klimadaten werden innerhalb der Gewächshäuser an jeweils 6 Standorten und außerhalb durch eine Wetterstation erfasst.

Im Sommerbetrieb 2010 stand die Ermittlung von energetischen Kennzahlen im Fokus der Untersuchungen. In diesem Zusammenhang wurden der Kollektorwirkungsgrad (Gl. 1), die Arbeitszahl der Wärmepumpe für den Kühl-/Heizfall (Gl. 2) sowie die Arbeitszahl des Gesamtsystems für den Kühl-/Heizfall unter Einbeziehung des Wärmepumpenprozesses inklusive der nachgelagerten Umwälzvorgänge im hydraulischen System (Gl. 3) berechnet.

$$\eta_{coll} = \frac{Q_{stor}}{Q_{r,e}} \quad (\text{Gl. 1}) \quad \beta_{hp} = \frac{Q_{hp}}{W_{hp}} \quad (\text{Gl. 2}) \quad \beta_{hp+} = \frac{Q_{hp}}{W_{hp+}} \quad (\text{Gl. 3})$$

η_{coll}	Kollektorwirkungsgrad	-
Q_{stor}	Wärmemengeneintrag in Speicher je Tag	[kWh]
$Q_{r,e}$	Wärmemengeneintrag durch Globalstrahlung außen je Tag	[kWh]
β_{hp}	Arbeitszahl der Wärmepumpe	-
β_{hp+}	Arbeitszahl des Gesamtsystems	-
Q_{hp}	Kühl-/Heizarbeit der Wärmepumpe je Tag	[kWh]
W_{hp}	elektrische Wärmepumpenarbeit für Kühlung/Heizung je Tag	[kWh]
W_{hp+}	elektrische Gesamtarbeit für Kühlung/Heizung je Tag	[kWh]

3. Ergebnisse

Abbildung 1 (A) zeigt mit welchen prozentualen Anteilen an der Gesamtkühlung die drei Wärmetauschersysteme (Rippenrohr, Schlauchgebläse, Aluflügelrohr) die Wärmeenergie aus dem geschlossenen Solarkollektorgewächshaus entziehen können. Für den Betrieb des Kollektorhauses vor Pflanzung der Tomatenkultur ergeben sich mittlere Anteile von ca. 55 % für die Rippenrohrkühlung, 30 % für die Schlauchgebläsekühlung und 15 % für die Kühlung über Aluflügelrohre. Mit dem Heranwachsen der Kultur und der ansteigenden pflanzlichen Transpirationsleistung verschoben sich diese Relationen. In Folge dessen wurde mit der wirksamen Kühloberfläche der Rippenrohre (864 m^2) eine Wärmemenge bis 886 kWh/d entzogen. Im Spätsommer 2010 stieg der mittlere Anteil der Dachkühlung bei voll entwickelter Blattfläche der Kultur auf nahezu 90 %. Gleichzeitig wurde mit dem Schlauchgebläsesystem ein mittlerer Kühlanteil von ca. 10 % erreicht. Durch starke Kondensation an den Aluflügelrohren und der Vermeidung von Nässebildung im Bestand, wurde dieses Kühlsystem mit einer Taupunktsteuerung versehen, wodurch sich der Kühlanteil der Aluflügelrohre auf ein marginales Niveau reduzierte.

Abbildung 1 (B) zeigt ab Kulturbeginn den ansteigenden Verlauf des überwiegend auf die pflanzliche Transpiration zurückzuführenden latenten Anteils an Wärmeenergie, der wiederum durch Kondensation an Schlauchgebläse- und Rippenrohrkühlung in sensible Wärmeenergie rückgewandelt und anschließend entzogen wurde. In diesem Kontext wurden bei einer voll entwickelten Blattfläche Kondensatmengen bis 445 l/d ($1,45 \text{ l/m}^2$ Grundfläche) im geschlossenen Kollektorgewächshaus erfasst. Dies entspricht bei einer angenommenen Verdampfungsenthalpie von $2,44 \text{ MJ/kg}$ Wasser einem Anteil der Latentkühlung von 36 % an der zugehörigen Tageskühlung durch Schlauchgebläse- und Rippenrohrsystem.

Abbildung 1 (C) zeigt für den Sommer 2010 den Verlauf des Kollektorwirkungsgrades beim Kollektorgewächshaus ohne Kultur und mit heranwachsendem Tomatenbestand. Mit dem Gewächshaus ohne Pflanzenbestand wurden mittlere Kollektorwirkungsgrade von 0,4 bis 0,5 erreicht. Mit dem bepflanzten Kollektorgewächshaus hingegen konnten mittlere Werte von 0,5 bis 0,8 erreicht werden. Kollektorwirkungsgrade über dem Wert 1 entstanden an einstrahlungsarmen Sommertagen, an denen durch hohe Temperaturen dennoch große Transpirations- und somit Kondensatleistungen erzielt wurden.

Abbildung 1 (D) zeigt ab Inbetriebnahme der Anlage die Verläufe der Monatssummen von der eingestrahlten Wärmeenergie auf die Gewächshausfläche und von der geladenen Wärmeenergie in den Speicher. Vom Zeitraum Mai bis Dezember 2010 wurde durch die Solarkollektoranlage eine Wärmemenge von rund 125 MWh (407 kWh/m^2 Grundfläche) gewonnen.

Die Abbildungen 1 (E) und (F) zeigen die Verläufe der täglichen Arbeitszahlen (Beta) des Wärmepumpenprozesses für Kühlung und Heizung, wobei in Abbildung 1 (F) zusätzlich die nachgelagerten Pump- und Umwälzvorgänge im hydraulischen System berücksichtigt wurden. Für den dargestellten Zeitraum von Mai bis Oktober 2010 liegt die mittlere Arbeitszahl der Wärmepumpe im Kühlbetrieb (SEER = Seasonal Energy Efficiency Ratio) bei 5,19 und sinkt unter Berücksichtigung der nachgelagerten Umwälzvorgänge (SEER+) auf 3,67. Die mittlere Arbeitszahl der Wärmepumpe im Heizbetrieb (HSPF = Heating Seasonal Performance Factor) liegt bei 4,67 und sinkt unter Berücksichtigung der nachgelagerten Umwälzvorgänge (HSPF+) auf 3,28.

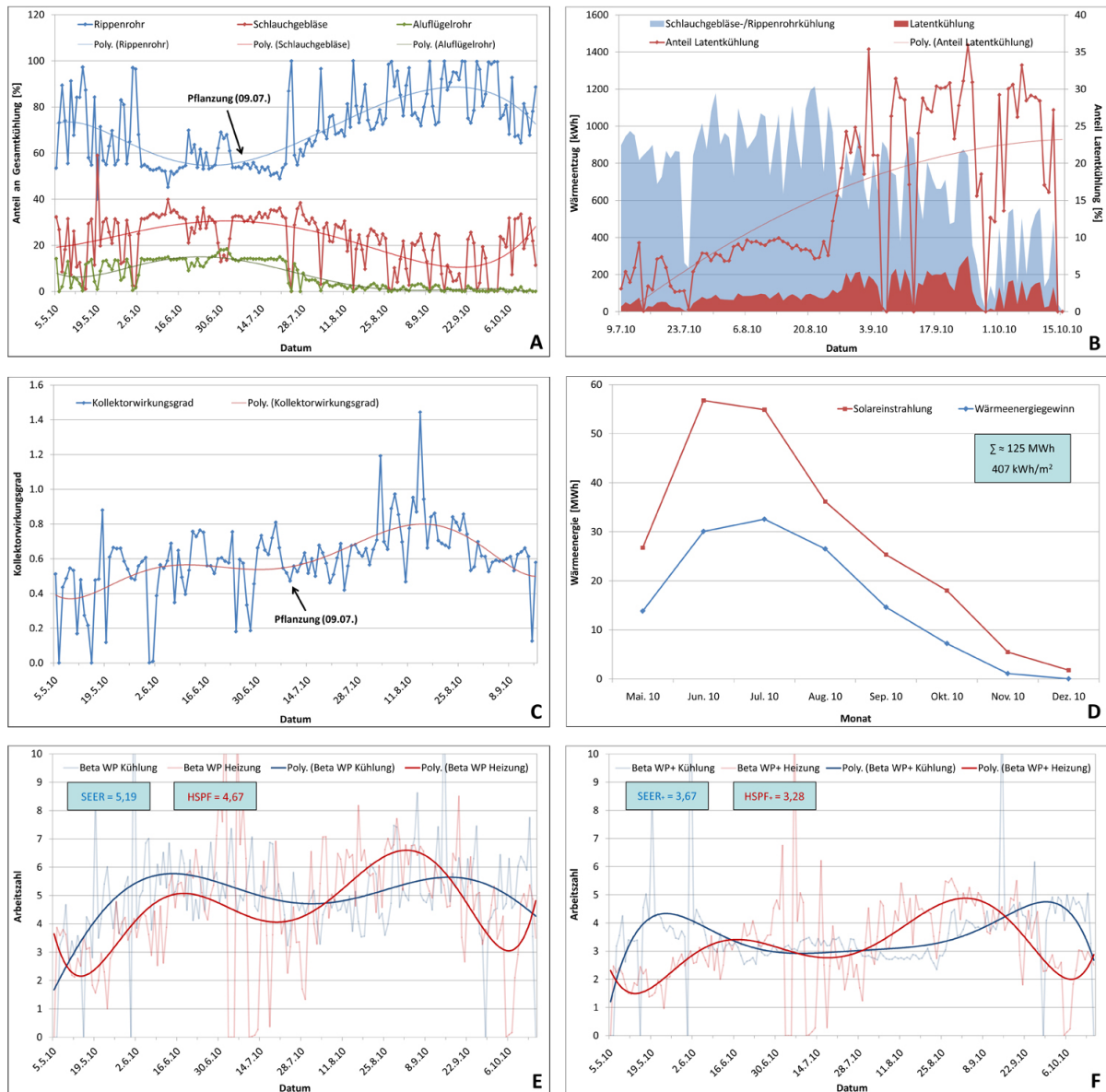


Abb. 1: Anteile der Kühlsysteme an Gesamtkühlung (A), Anteil der Latentkühlung (B), Verlauf des Kollektorwirkungsgrades (C), Verlauf des Wärmeenergiegewinns (D), Verlauf der AZ der Wärmepumpe (E), Verlauf der AZ der Wärmepumpe inkl. Umwälzvorgänge (F)

4. Diskussion

Mit ansteigender pflanzlicher Transpirationsleistung und Kondensation des energiereichen Wasserdampfs an den Kühlrohren im Dachbereich wuchs die Effizienz, der auf natürlicher Konvektion der Luft basierenden stillen Kühlung. Die bisher ermittelten Kondensatmengen verweisen auf einen hohen Anteil der pflanzlichen Latentkühlung. In diesem Kontext bietet sich eine Wiederverwendung des Kondensats für Bewässerungszwecke an.

Bei einfachen Flachkollektoren liegt der Kollektorwirkungsgrad bei etwa 0,5 und bei modernen Vakuumkollektoren kann dieser 0,8 erreichen (Kaltschmitt und Streicher, 2009).

Dieser hohe Wirkungsgrad konnte mit dem bepflanzten Solarkollektorgewächshaus ebenfalls erreicht werden. Hierbei ist die relativ niedrige Kollektortemperatur ($< 30\text{ °C}$) durch die pflanzliche Latentkühlung entscheidend, weil dies den Wärmeverlust des Gewächshauses durch Strahlung und Konvektion gegenüber technischen Solarkollektoren vermindert. Im laufenden Gewächshausbetrieb unterliegt der Kollektorwirkungsgrad jedoch Schwankungen durch die Klimasteuerung, da sich bei hohen Lufttemperaturen ($> 30\text{ °C}$) die Notlüftung öffnet und somit der Kollektorwirkungsgrad sinkt.

Die bisher ermittelten saisonalen Arbeitszahlen des direkten Wärmepumpenprozesses entsprechen den theoretischen Angaben des Herstellers und liegen auf dem Niveau vergleichbarer Studien (Opdam et al., 2005). Die täglich ermittelten Arbeitszahlen unterliegen insbesondere im Heizbetrieb größeren Schwankungen, welche sich aus der Einschalthäufigkeit und der Laufzeit der Wärmepumpe ergeben. Bei der Kühlung schwanken die Arbeitszahlen geringer, da vermehrt im Dauerbetrieb gekühlt wird. Bei der Wärmepumpenanwendung im Gewächshaus entsteht ein doppelter anbautechnischer Nutzen. Durch den Kühlbetrieb werden Stresszustände im Bestand vermieden und durch die geschlossene Lüftung kann bei Begasung der CO_2 -Gehalt im Gewächshaus nachhaltig angehoben werden. Demgegenüber können durch den Heizbetrieb der Wärmepumpe die im Wärmebedarfsfall notwendigen Luft- und Pflanzentemperaturen erzielt werden. Problematisch dabei ist das zeitliche Auseinanderfallen von Kälte- und Wärmebedarf. Für die Bewertung der energetischen Effizienz wurden deshalb getrennte Betrachtungen zum Heiz- und Kühlbetrieb angestellt.

5. Schlussfolgerung

Die untersuchten Kühl- und Entfeuchtungssysteme sind geeignet, den geschlossenen Betrieb des Solarkollektorgewächshauses zu realisieren, wobei die Rippenrohrkühlung im Dachbereich besonders effizient arbeitet. Die pflanzliche Transpiration trägt zur Erreichung eines hohen Kollektorwirkungsgrades der Anlage bei. Im Versuchsjahr 2011 werden die energetischen Untersuchungen wiederholt und auf eine Ganzjahreskultur ausgedehnt. Das System wird im Bezug auf einen Kompromiss zwischen maximalen Wärmeentzug unter möglichst geringen Primärenergieaufwendungen (Pumpenregelung) und Ertragsbildung bei CO_2 -Anreicherung zu optimieren sein. Außerdem wird der Einfluss der pflanzlichen Latentkühlung auf den Wärmebedarf von Gewächshäusern untersucht.

6. Literatur

Damrath, J. (1982): Solarenergienutzung im Gewächshaus: Eine energetische Darstellung des doppelbedachten Gewächshauses mit solarunterstützter Heizung. Heft 14, Gartenbautechnische Informationen, Universität Hannover.

Kurtán, S. (1988): Der Wärmegewinn aus geschlossenen Gewächshäusern unter Berücksichtigung der Wasserdampfkondensation und der Wärmespeicherung. Dissertation, Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg.

Opdam, J. J. G., Schoonderbeek, G. G., Heller, E. M. B. (2005): Closed Greenhouse: a Starting Point for Sustainable Entrepreneurship in Horticulture. Acta Hort. 691: 517-524.

Kaltschmitt, M., Streicher, W. (2009): Regenerative Energien in Österreich: Grundlagen, Systemtechnik, Umweltaspekte, Kostenanalysen, Potenziale, Nutzung. Vieweg + Teubner.