

German Society of Horticultural Sciences (DGG)
Lentzeallee 55/57
Humboldt-Universität zu Berlin
D-14195 Berlin



DGG-Proceedings, Vol. 4, 2014

Short Communications – Annual Conference DGG and BHGL
05.03. - 08.03. 2014, Dresden, Germany

Peer Reviewed

Editorial Board and Review

Dirksmeyer, Walter *Braunschweig*
Fricke, Andreas *Hannover*
Hardeweg, Bernd *Hannover*
Laber, Hermann *Dresden*
Mibus-Schoppe, Heiko *Geisenheim*
Michaelis, Gerlinde *Bad-Zwischenahn*
Rath, Thomas *Osnabrück*
Richter, Ellen *Braunschweig*
Schmidt, Uwe *Berlin*
Schuster, Mirko *Dresden*
Sparke, Kai *Geisenheim*
Thomas, Jens *Osnabrück*
Wackwitz, Wolf-Dietmar *Dresden*
Winkelmann, Traud *Hannover*
Zinkernagel, Jana *Geisenheim*
Zude, Manuela *Berlin*

Ingo Schuch*, Dennis Dannehl, Thorsten Rocks, Uwe Schmidt

Energieeffizienz des Solarkollektorgewächshauses mit Wärmespeicher -
ein Resümee aus 5 Jahren ZINEG-Projektarbeit

*Corresponding Author:

Ingo Schuch
Humboldt-Universität zu Berlin
Fachgebiet Biosystemtechnik
Germany
Email: mail@ingo-schuch.eu

Energieeffizienz des Solarkollektorgewächshauses mit Wärmespeicher - ein Resümee aus 5 Jahren ZINEG-Projektarbeit

Ingo Schuch, Dennis Dannehl, Thorsten Rocks, Uwe Schmidt

Humboldt-Universität zu Berlin, Fachgebiet Biosystemtechnik, Germany

1. Einleitung, Stand des Wissens, Zielsetzung

Angesichts wachsender Energiekosten und Umweltbelastungen durch fossile Brennstoffe ist die Steigerung der Energieeffizienz bei Gewächshäusern von großer Bedeutung. Daher wurde die ZukunftsInitiative NiedrigEnergieGewächshaus (ZINEG) initiiert. Das Gesamtziel der von 2009 bis 2014 durchgeführten nationalen Verbundforschung war es, den fossilen Wärmeverbrauch für die Gewächshausproduktion deutlich zu reduzieren.

Hierzu wurde an der Humboldt-Universität das Konzept zur Nutzung von Gewächshäusern als thermische Solarkollektoren weiterentwickelt. Dafür ist die geschlossene Betriebsweise eine grundlegende Voraussetzung. Dies bedeutet, dass die solare Überschusswärme im Gewächshaus durch geeignete Kühltechnik unter möglichst geringem Energieaufwand abzuführen ist. Zudem erfordert eine spätere Nutzung der gewonnenen Solarwärme ein gut isoliertes Gewächshaus und adäquates Speicherkonzept. Zur technisch-energetischen Bewertung einer solchen Kollektoranlage, die aus dem Gewächshaus, der Solartechnik und dem Speicher besteht, ergeben sich folgende zu beantwortende Fragen:

- 1) Wie hoch ist die Wärmeeinsparung bei differenten Schirmszenarien im Gewächshaus?
- 2) Wie hoch ist die Wärmepumpeneffizienz für den Kühl-/Heizbetrieb im Gewächshaus?
- 3) Welchen Einfluss hat die technische Kühlung auf das Gewächshausklima?
- 4) Wie viel Solarwärme kann durch den Kollektor in Speicherwärme umgesetzt werden?
- 5) Welche Wärmedämmung empfiehlt sich bei einem oberirdischen Mischspeicher?

Im Kontext der Gewinnung von solarer Nutzwärme wurden bereits einige Lösungsansätze entwickelt, bei denen der Wärmeüberschuss im Gewächshaus über zwangsluftgeführte Kühlung in Bodennähe (Qian et al. 2012) oder über freie Konvektion an Dachkühlflächen (Campen und Bot 2002) entzogen wird. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass die Kühlung von oben mittels Rippenrohren eine Lichtminderung (3%) bewirkt und die Kühlung von unten mittels Schlauchgebläse einen vertikalen Lufttemperaturgradient (5 K) erzeugt.

Zum Einsatz von Wärmepumpen in Gewächshäusern wurden ebenfalls Untersuchungen durchgeführt. Hierzu berichten Tong et al. (2010) und Chai et al. (2012) von einer breiten Streuung der energetischen Effizienz mit Arbeitszahlen von 3,3 bis 5,8.

Ein weiterer Bestandteil im etablierten Konzept vom semi-geschlossenen Gewächshaus ist die saisonale Wärmespeicherung in großvolumigen Aquiferen in bis zu 100 m Tiefe (Bot et al. 2005), wobei die geologische Beschaffenheit nicht immer gegeben ist und ein hoher Energieaufwand für den Wassertransport anfallen kann. Demgegenüber können jährliche Solarwärmeerträge bis 270 kWh/m² und tägliche Kollektorwirkungsgrade bis 0,65 erreicht werden (Sonneveld et al. 2010).

2. Material und Methoden

Die Versuchsanlage umfasst zwei Gewächshäuser und einen Niedertemperaturspeicher. Das semi-geschlossene Kollektorhaus (KH) ist als pflanzenbauliche Produktionsstätte und als thermischer Solarkollektor konzipiert. Das konventionelle Referenzhaus (RH) dient zum Vergleich. Die technischen Parameter sind der Grafik zu entnehmen (Abb. 1).

In der Anlage wird das Wärmepumpenprinzip verwendet. Hierbei ermöglicht die spezielle hydraulische Einbindung des Kompressionsaggregats ein Umschalten zwischen Kühl- und Heizwassererzeugung. Im Gegensatz zum RH befinden sich Rippenrohrwärmetauscher im Dachraum des KH, die ab einer Innentemperatur von 21 °C zur Kühlung/Entfeuchtung von konvektiv-aufsteigender Luft dienen. Außerdem ist im KH das Schlauchgebläsesystem für Kühl- und Heizzwecke nutzbar. Beim Speicherkonzept wird auf eine Trennung von Warm- und Kaltwasser verzichtet und stattdessen ein oberirdischer Mischspeicher verwendet.

Zur Erfassung der Wärmeströme kamen neun Wärmemengenzähler zum Einsatz. Die Messungen zum Elektroenergieverbrauch der Wärmepumpe und Nebenantriebe erfolgten mit zwei Elektrozählern. Hinsichtlich der Lufttemperaturschichtung wurde im Gewächshaus eine Sensorkette aus sieben Messgeräten in Höhen von 10, 150, 250, 350, 450, 560 und 590 cm installiert. Die Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit der Luft basiert auf einer Rastermessung mittels Hitzekugel-Anemometer (Genauigkeit $\pm 0,03$ m/s).

Die Quantifizierung des Wärmeverbrauchs erfolgte mittels Wärmeverbrauchskoeffizienten. Der ermittelte Kollektorwirkungsgrad beschreibt den speicherbaren Anteil der Solarwärme und die Arbeitszahl das Verhältnis aus thermischer zu elektrischer Arbeit. Als Quotient aus Arbeitszahl und Primärenergiefaktor resultiert indessen der Primärenergienutzungsgrad.

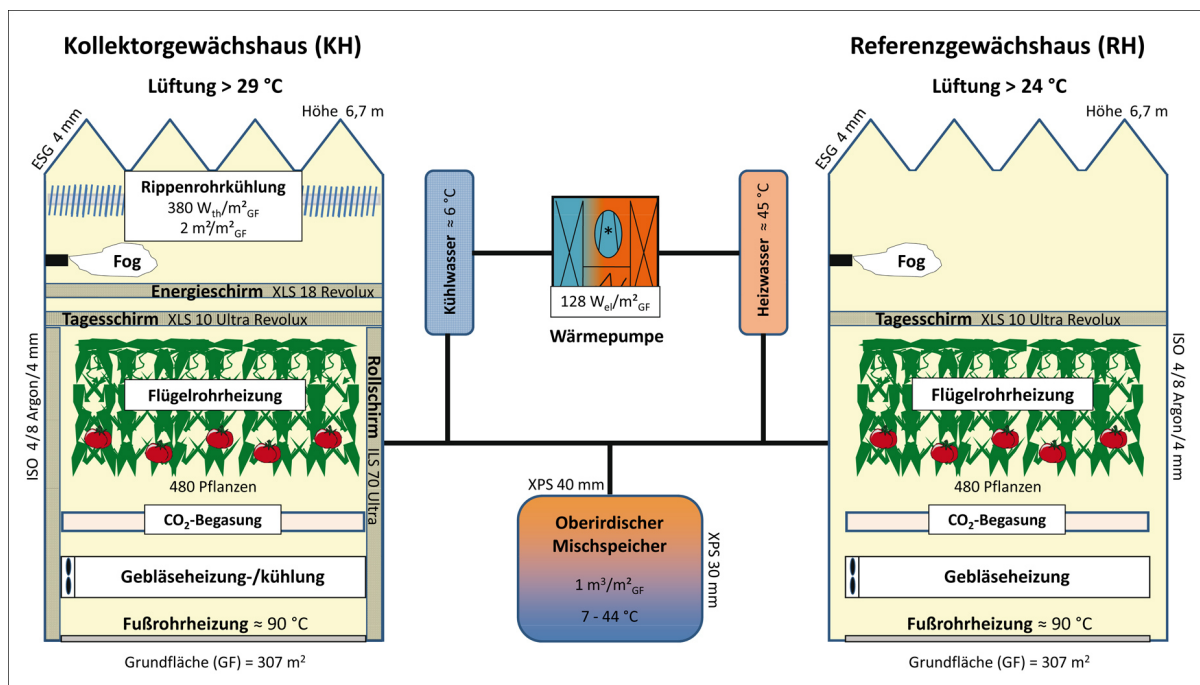


Abb. 1: Technisches Konzept der ZINEG-Versuchsanlage am Standort Berlin-Dahlem

3. Ergebnisse

Abbildung 2-A zeigt die ermittelten Wärmeverbrauchskoeffizienten (U_{cs}) bei verschiedenen Energieschirmszenarien. Zur Bestimmung der prozentualen Energieeinsparung wurde der Wärmeverbrauch ohne Schirm zugrunde gelegt ($4,9 \text{ W/m}^2\text{K}$). Dieser reduziert sich bei Nutzung eines Schirms um etwa 43%, mit Doppelschirm um 59% und Doppel-/Rollschirm um 63%. Beim Dampfschleusen beträgt die Einsparung etwa 57%. Bei dieser neuartigen Strategie für Doppelschirme soll Wasserdampf vom Pflanzenbereich zur Kondensation in den Dachbereich gelangen, ohne wesentliche Mengen an sensibler Wärme zu verlieren. Dabei wird die untere Schirmlage für 120 s mit einem Spalt geöffnet (40%). Danach folgt die obere Schirmlage. Diese nächtliche Prozedur wiederholt sich alle 15 min.

Abbildung 2-B zeigt die ermittelten Arbeitszahlen und Primärenergienutzungsgrade (PER) für den wärmepumpengestützten Kühl-/Heizbetrieb in der Gewächshausanlage. So ergibt sich für drei Perioden des Tomatenanbaus eine Kühlarbeitszahl von 4,9 (PER = 1,9) und Heizarbeitszahl von 4,5 (PER = 1,7). Unter Berücksichtigung aller Nebenantriebe sinkt die Arbeitszahl des Kühlers auf 3,3 (PER = 1,3) und Heizens auf 3,1 (PER = 1,2).

Abbildung 2-C veranschaulicht, welchen Einfluss die Lage (oben/unten) und Betriebsweise (aktiv/passiv) von Kühltechnik auf die Temperaturschichtung im Gewächshaus haben. So bewirkt bei geschlossener Lüftung eine auf erzwungene Konvektion basierende Kühlung von unten mit Schlauchgebläse ein Delta $T_{max} = 25 \text{ K}$ zwischen Boden und Dachbereich bzw. 11 K zwischen Boden und Bestandsmitte. Unter zusätzlichem Stoßlüften beträgt das Delta $T_{max} = 15 \text{ K}$ bzw. 8 K. Wird von oben über freie Konvektion an Rippenrohren gekühlt, resultiert eine homogenere Schichtung mit einem Delta $T_{max} = 5 \text{ K}$ bzw. 2 K.

Abbildung 2-D zeigt den Einfluss der im Dachbereich positionierten Rippenrohrkühlung auf die Luftgeschwindigkeit im KH. Hierzu wurden Strömungsgeschwindigkeiten bis $0,2 \text{ m/s}$ ermittelt. Dabei erstreckt sich die auf freie Konvektion basierende Luftumwälzung über das gesamte Gewächshausinnere. Demgegenüber bewirkt eine aktive Kühlung von unten mit Schlauchgebläse eine höhere Luftgeschwindigkeit. Allerdings tritt diese nur in Bodennähe auf ($< 1 \text{ m}$) und wirkt nicht im darüber liegenden Bestandsbereich (nicht abgebildet).

Abbildung 2-E zeigt, dass von Februar bis November etwa 500 kWh/m^2 (bezogen auf die Grundfläche des KH) in den Wärmespeicher gelangten. Zeitgleich lag der Verbrauch des KH bei etwa 270 kWh/m^2 und RH bei 291 kWh/m^2 . Vergleichsweise hohe Wärmemengen wurden in der einstrahlungsreichen Periode in den Speicher geladen. Daher wurde mittels Kühlturm (KT) ein zusätzlicher Abnehmer von Speicherwärme (250 kWh/m^2) zugeschaltet. Als besonders effizient bei der Umsetzung von Solarstrahlung in Speicherwärme zeigt sich das Kollektorsystem im Spätsommer mit adulten Pflanzen (Blattflächenindex $\sim 2,5 \text{ m}^2/\text{m}^2$) und Tageskollektorwirkungsgraden bis 0,8. Dabei führt die Kondensation energiereichen Wasserdampfs an der Kühloberfläche der Wärmetauscher (Solarabsorber) zum Anstieg des latenten Wärmeanteils auf Tageswerte bis 35% (Jahresmittel 22%).

Abbildung 2-F zeigt die ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten (U) der oberirdischen Speicherbauteile bei verschiedenen Dämmvarianten. Beim Tankspeicher ohne Dämmung beträgt der Wärmeverlust etwa 40% der Jahrresspeicherwärme. Werden handelsübliche 30 und 40 mm dicke Dämmplatten (Wärmeleitfähigkeit $\sim 0,035 \text{ W/mK}$) an den oberirdischen Speicherflächen angebracht, kann der Wärmeverlust um nahezu 80% gesenkt werden. Ferner wurde beim Speicher auf eine Trennung von Warm- und Kaltwasser verzichtet. So traten mit einem Delta $T_{max} = 3,4 \text{ K}$ nur geringe Temperatursprünge auf (nicht abgebildet).

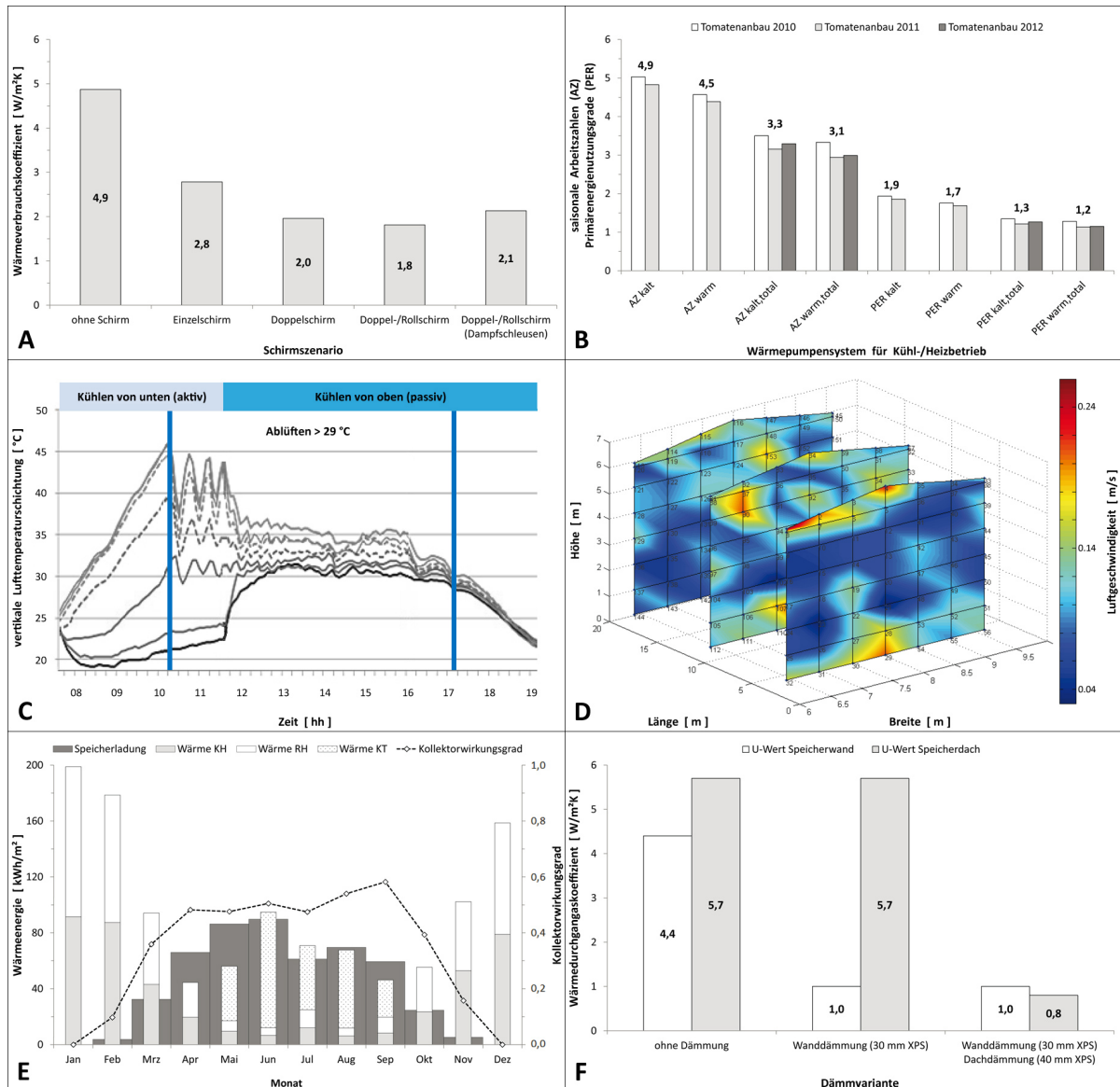


Abb. 2: Wärmeverbrauch bei unterschiedlichen Schirmszenarien (A), Wärmepumpeneffizienz (B), Temperaturschichtung bei Kühlung unten/oben (C), Luftströmung bei Kühlung oben (D), Speicherladung vs. Wärmeverbrauch (E), U-Werte bei unterschiedlicher Speicherdämmung (F)

4. Diskussion

In der Kollektoranlage wird eine Wärmepumpe für den Kühl-/Heizbetrieb genutzt. Hierzu wurden Arbeitszahlen bis 4,9 ermittelt (Abb. 2-B). Im Vergleich berichten Tong et al. (2010) über Werte bis 5,8 und Chai et al. (2012) bis 3,9. Hinsichtlich der Substitution fossiler Brennstoffe ($PER > 1$) ergaben sich Primärenergie nutzungsgrade (PER) bis 1,9. Zur Kühlung von oben wurden Rippenrohrwärmetauscher verwendet. Dabei entsteht die zur Wärmeübertragung notwendige Luftbewegung (bis 0,2 m/s) durch freie Konvektion aufsteigender Luft. Hierzu ergab sich bei semi-geschlossener Fahrweise eine homogenere

Lufttemperaturschichtung zwischen Boden und Bestand (2 K) als bei Qian et al. (2012) mit Schlauchgebläse (5 K) bzw. den eigenen Messungen (8 K) zur Kühlung von unten. Als effizient zeigte sich das KH mit adulten Pflanzen und Kollektorwirkungsgraden bis 0,8. Demgegenüber geben Sonneveld et al. (2010) Werte bis 0,65 an. In puncto Lichtminderung durch fest installierte Kühlrohre im Dach (Campen und Bot 2002) schlagen Schmidt et al. (2014) höhenbewegliche Wärmetauscher vor, die für Kühl- und Heizzwecke nutzbar sind, wodurch Gebläse- und Flügelrohrheizung entfallen könnten. Entgegen der Untergrund-Wärmespeicherung in großvolumigen Aquiferen (Bot et al. 2005) wird bei der Kollektoranlage ein oberirdischer Tankspeicher mit einem kleinen Verhältnis von Wasservolumen zu Gewächshausfläche genutzt. Nach Schmidt et al. (2014) könnte die Speicherung von Niedertemperaturwärme jedoch auch in einem bereits vorhandenen, großvolumigen Wasserreservoir (z.B. Teich) mit Schwimmsolisierung erfolgen.

5. Schlussfolgerung

Mit dem untersuchten Konzept, bestehend aus 50% Kollektor- und 50% konventioneller Gewächshausfläche kann von Februar bis November Solarwärme auf dem Wirkniveau von Flachkollektoren gewonnen werden. Der hohe Wirkungsgrad entsteht auch dadurch, weil die Pflanzen durch Transpiration und Kondensation an der Kollektorleistung beteiligt sind. Hierzu müssen Kühlflächen vorhanden sein ($<$ Taupunkttemperatur), was den Einsatz von Wärmepumpen erfordert. Eine probate Kühlmethode ist aus thermisch-energetischer Sicht die Rippenrohrkühlung im Dachbereich. Die so gewonnene Wärme ist zunächst für die Kollektorfläche selbst nutzbar. Von April bis Oktober bietet sich hingegen ein Wärmeexport (z.B. andere Gewächshäuser) oder eine Luxuswärmeversorgung (z.B. Trockenheizen) an. Entgegen der Verwendung thermisch getrennter Speicher empfiehlt sich ein oberirdischer Mischspeicher für Kühl-/Heizzwecke. Ferner bietet sich die Nutzung bereits vorhandener Wasserreservoirs an. Dies setzt jedoch eine Dämmung der freien Wasserfläche voraus.

6. Literatur

- Bot, G., van de Braak, N., Challa, H., Hemming, S., Rieswijk, T., van Straten, G., Verlodt, I. (2005): The solar greenhouse: state of the art in energy saving and sustainable energy supply. *Acta* 691, 501-508.
- Campen, J., Bot, G. (2002): SE-structures and environment: dehumidification in greenhouses by condensation on finned pipes. *Biosyst. Eng.* 82, 177-185.
- Chai, L., Ma, C., Ni, J.-Q., (2012): Performance evaluation of ground source heat pump system for greenhouse heating in northern China, *Biosyst. Eng.* 111, 107-117.
- Qian, T., Dielemann, J., Elings, A., de Gelder, A., van Kooten, O., Marcelis, L. (2012): Vertical temperature gradients in the semi-closed greenhouses: occurrence and effects. *Acta* 927, 59-66.
- Schmidt, U., Schuch, I., Dannehl, D., Rocks, T. (2014): Solarkollektorgewächshaus - Machbarkeit eines innovativen technischen Konzepts. www.hortigate.de/bericht?nr=60025.
- Sonneveld, P., Swinkels, G., Campen, J., van Tuijl, B., Janssen, H., Bot, G. (2010): Performance results of a solar greenhouse combining electrical and thermal energy production. *Biosyst. Eng.* 106, 48-57.
- Tong, Y., Kozai, T., Nishioka, N., Ohyama, K. (2010): Greenhouse heating using heat pumps with a high coefficient of performance (COP). *Biosyst. Eng.* 106, 405-411.