

# **Abschlussbericht**

## **06UM009**

### **Teil I**



## **Technische Universität München**

**Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung  
und Umwelt**

**Fachgebiet Technik im Gartenbau**

**„Nutzung der Restwärme einer Geothermie-Anlage zur CO<sub>2</sub>-neutralen  
Beheizung eines Gewächshauskomplexes“**

**06UM009**

### **Abschlussbericht**

Weihenstephan, den 24.01.2011

Projektleiter: Prof. Dr. Joachim Meyer (TU München, FG Technik im Gartenbau)

Bearbeitung: Dipl.-Ing. Markus Pietzsch (TU München, FG Technik im Gartenbau)

Unterauftrag für pflanzenbauliche Versuche:



**Humboldt-Universität zu Berlin**

Fachgebiet Technik im Gartenbau

Projektleiter: Prof. Dr. Uwe Schmidt (HU Berlin, FG Technik im Gartenbau)

Bearbeitung: Dr. Nazim Gruda (HU Berlin, FG Technik im Gartenbau)

Die Förderung des Vorhabens erfolgte aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung,  
Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und  
Ernährung (BLE).

## Inhalt

Tabellen- und Abbildungsverzeichnis.....	4
1. Einleitung und Aufgabenstellung .....	6
1.1 Einleitung.....	6
1.2 Aufgabenstellung .....	7
2. Planung und Ablauf der Arbeiten.....	8
2.1 Planung der Arbeiten .....	8
2.1 Ablauf der Arbeiten.....	9
3. Das Gewächshaus.....	11
3.1 Grundkonstruktion .....	11
3.2 Bedachung.....	12
3.3 Ausstattung .....	13
3.3.1 Grundausrüstung .....	13
3.3.2 Heizungssystem.....	14
3.3.3 Belichtungssystem.....	18
3.3.4 Energieschirme.....	18
4. Forschungsarbeiten.....	19
4.1 Messdatenerfassung .....	19
4.1.1 Messstation und Datalogger .....	19
4.1.2 Temperaturmessung .....	20
4.1.3 Luftfeuchtemessung.....	20
4.1.4 Einstrahlungsmessung.....	20
4.1.5 Zähler für Durchflussmenge .....	21
4.1.6 Messpunkte .....	21
4.2 Bestimmung des Wärmeverbrauchscoeffizienten.....	23
4.2.1 Allgemeines .....	23
4.2.2 Gradientenmessung .....	23
4.2.3 Wärmeverbrauchsmessung .....	26
4.3 Lichtangebot im Gewächshaus.....	33
4.4 Klima im Sommer .....	37
4.4.1 Temperaturverläufe .....	37
4.4.2 Feuchte.....	39
4.5 Temperaturen im Winter .....	40
4.6 Wärmebereitstellung und Verluste.....	43
5. Simulation .....	44

5.1 Grundlagen.....	44
5.2 Strategien zur Temperaturführung .....	45
5.2.1 Cool morning.....	45
5.2.2 Temperatursummenstrategie .....	45
5.2.3 Luxuswärmestrategie .....	45
5.3 Grundannahmen für die Simulation.....	46
5.4 Ergebnisse .....	47
5.4.1 Temperaturen und Wärmeverbrauch im Winter.....	47
5.4.2 Temperaturen und Wärmeverbrauch im Sommer .....	50
5.4.3 Luxuswärmestrategie .....	52
5.4.4 Gesamtwärmeverbrauch und Wärmeleistung.....	54
5.4.5 Einsparung fossiler Energieträger .....	57
5.4.6 Erweiterungspotential.....	58
5.4.7 Wirtschaftlichkeit .....	59
6. Auswirkungen auf das Erdwärme-Heizkraftwerk.....	61
7. Übertragbarkeit auf andere Betriebe.....	62
8. Zusammenfassung.....	64
9. Abstract .....	66

## Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Dreidimensionale Grafik des Gewächshauses .....	11
Abb. 2: Abmessungen des Gewächshauses .....	11
Abb. 3: Querschnitt durch das Gewächshaus; Maßangaben in mm.....	12
Abb. 4: Betonsockel als Fundament für die Stahlträger .....	12
Abb. 5: Vorrichtung zum Aufblasen der Doppelfolie .....	13
Abb. 6: Aufzuchtfläche im Haus 3/4.....	13
Abb. 7: Einführung der Fernwärmeleitung ins Gewächshaus.....	14
Abb. 8: Bodenheizung nach dem Tichelmannprinzip.....	15
Abb. 9: Lufterhitzer .....	16
Abb. 10: Wärmeverteilung über die Polyethylenschläuche.....	16
Tab. 1: Elektrische Kennzahlen der Lufterhitzer .....	16
Abb. 11: Ansteuerung und Anordnung der Lufterhitzer in den Gewächshäusern (Herstellerzeichnung) .....	17
Abb. 12: Ansteuerung und Verlegung der Bodenheizungsleitungen (Herstellerzeichnung) .....	17
Abb. 13: Anordnung der Stehwandheizung in den Häusern 2,3 und 4 (Herstellerzeichnung).....	17
Tab. 2: Technische Daten des Solarimeters .....	20
Abb. 14: Strahlungsintegrator.....	21
Tab. 3: Technische Daten zum Strahlungsintegrator .....	21
Abb. 15: Anbringung der Messfühler .....	22
Abb. 16: Grundriss mit den eingetragenen Messpunkten .....	22
Abb.17: Luftschichtenmessung im Haus 3/4, bei offenem und dann geschlossenem Energieschirm, bei Gebläsestufe 5.....	24
Abb.18: Luftschichtenmessung im Haus 3/4, bei geschlossenem Energieschirm, bei Gebläsestufe 5, nach Absenkung der Folienschläuche .....	25
Abb. 19: Temperaturen im Haus 2 bei geöffnetem Energieschirm .....	26
Abb. 20: Verlauf des Wärmeverbrauchscoeffizienten $u'$ im Haus 2 bei geöffnetem Schirm .....	27
Abb. 21: Verlauf des Wärmeverbrauchscoeffizienten $u'$ im Haus 2 bei geschlossenem Schirm, ohne LH, Januar 2010.....	28
Abb. 22: Verlauf des Wärmeverbrauchscoeffizienten $u'$ im Haus 3/4 bei geschlossenem Schirm, Januar 2010 .....	28
Abb. 23: Verlauf des Wärmeverbrauchscoeffizienten $u'$ in der Arbeitshalle, Januar 2010.....	29
Abb. 24: Verlauf des Wärmeverbrauchscoeffizienten $u'$ im Haus 2 bei geschlossenem Schirm, ohne LH, Februar 2010 .....	30
Abb. 25: Verlauf des Wärmeverbrauchscoeffizienten $u'$ im Haus 3/4 bei geschlossenem Schirm, Februar 2010 .....	30
Abb. 26: Verlauf des Wärmeverbrauchscoeffizienten $u'$ in der Arbeitshalle, Februar 2010.....	31
Abb. 27: $u'$ -Werte im Haus 2 in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, geregelter Betrieb.....	31
Abb. 28: $u'$ -Werte im Haus 3/4 in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, geregelter Betrieb ...	32
Abb. 29: $u'$ -Werte in der Arbeitshalle in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, geregelter Betrieb.....	32
Abb. 30: Messung der Lichteinstrahlung und Durchlässigkeit am 12.12.2007 im Haus 2 .....	34
Abb. 31: Messung der Lichteinstrahlung und Durchlässigkeit am 29.01.2008 im Haus 2 .....	34
Abb. 32: Messung der Lichteinstrahlung und Durchlässigkeit am 02.10.2008 im Haus 2 .....	35

Abb. 33: Messung der Lichteinstrahlung und Durchlässigkeit am 02.10.2008 im Haus 3 bei niedriger Einstrahlung .....	36
Abb. 34: Messung der Lichteinstrahlung und Durchlässigkeit am 02.10.2008 im Haus 3 bei hoher Einstrahlung .....	36
Abb. 35: Temperaturverläufe im Gewächshaus – Sommersituation bei hoher Einstrahlung .....	37
Abb. 36: Temperaturverläufe im Gewächshaus – Sommersituation bei niedriger Einstrahlung .....	38
Abb. 37: Vergleich Einstrahlung und Bodentemperatur im Haus 2.....	38
Abb. 38: Vergleich Einstrahlung und Relative Luftfeuchte im Haus 2.....	39
Abb. 39: Vergleich verschiedener Temperaturverläufe vom 26.11. – 01.12.2008 in Haus 2 .....	40
Abb. 40: Vergleich verschiedener Temperaturverläufe vom 26.11. – 01.12.2009 in Haus 3 .....	42
Abb. 41: Außentemperaturverlauf vom 22. – 27.01.2010.....	47
Abb. 42: Innentemperaturverlauf im Haus 3 für den Zeitraum vom 22. – 27.01.2010.....	48
Abb. 43: Wärmeverbrauch im Haus 3 für den Zeitraum vom 22. – 27.01.2010.....	48
Abb. 44: Innentemperaturverlauf im Haus 2 für den Zeitraum vom 22. – 27.01.2010.....	49
Abb. 45: Wärmeverbrauch im Haus 2 für den Zeitraum vom 22. – 27.01.2010.....	49
Abb. 46: Außentemperaturverlauf vom 02. – 07.06.2008.....	50
Abb. 47: Innentemperaturverlauf im Haus 3 für den Zeitraum vom 02. – 07.06.2008.....	51
Abb. 48: Wärmeverbrauch im Haus 3 für den Zeitraum vom 02. – 07.06.2008.....	51
Abb. 49: Wärmeverbrauch im Haus 2 für den Zeitraum vom 02. – 07.06.2008.....	52
Abb. 50: Abweichung der Durchschnittstemperatur bei Anwendung der Luxuswärmestrategie zur klassischen Temperaturführung, im Vergleich zur Außentemperatur; Jahresgang 2008 .....	52
Abb. 51: Abweichung der Durchschnittstemperatur bei Anwendung von <i>Cool morning</i> und einer maximalen Heiztemperatur von 18 °C zur klassischen Temperaturführung, im Vergleich zur Außentemperatur; Jahresgang 2008 .....	53
Abb. 52: Jahresdauerlinie der Heizleistungen im Jahr 2008 .....	54
Abb. 53: Ausschnitt der 100 höchsten Heizleistungen aus der Jahresdauerlinie 2008 .....	54
Abb. 54: Jahresdauerlinie der Heizleistungen im Jahr 2009 .....	56
Abb. 55: Ausschnitt der 100 höchsten Heizleistungen aus der Jahresdauerlinie 2009 .....	56
Tab. 4: Jahreswärmeverbrauch 2008 der verschiedenen Varianten .....	57
Tab. 5: Jahreswärmeverbrauch 2009 der verschiedenen Varianten .....	57
Tab. 6: Maximale Heizleistungen der Jahre 2008, 2009 und 2010 .....	58
Tab. 7: Heizkosten bei unterschiedlichen Wärmepreisen .....	59
Tab. 8: Einsparungen bei den Heizkosten im Vergleich zu Heizöl.....	60

# 1. Einleitung und Aufgabenstellung

## 1.1 Einleitung

Die Gärtnerei Baumgärtner wurde im Jahr 2006 mit Sitz in Ludwigslust gegründet. Im Jahr 2007 wurden an den Standorten Ludwigslust und im etwa 10 km entfernten Neustadt-Glewe Produktionsgewächshäuser errichtet. Diese Standorte wurden aufgrund ihrer guten Anbindung an die Ballungsräume Berlin (180 km) und Hamburg (120 km) ausgewählt. Ein weiterer Grund für diese Standortwahl war die geringe Anzahl von Mitbewerbern in Mecklenburg-Vorpommern.

Die produzierten Zierpflanzen werden von der Gärtnerei Baumgärtner an verschiedene Gartencenter und an den Einzelhandel in Berlin und Hamburg über eine Auftragsproduktion vertrieben. Einen weiteren Absatzmarkt stellt der Großmarkt der Fa. Landgard in Herzprung dar. Direktvermarktung findet nicht statt.

Die Gärtnerei Baumgärtner produziert in Ludwigslust auf einer Containerfläche Freilandstauden und im Gewächshaus Zierpflanzen mit geringen Wärmeansprüchen. Am Standort Neustadt-Glewe werden die klassischen Warmhauskulturen Weihnachtsstern und Pelargonien produziert.

Der Grund für die Wahl des Standorts Neustadt-Glewe zur Produktion der Warmhauskulturen liegt im örtlichen Wärmeangebot durch das dort ansässige Erdwärme-Heizkraftwerk. Über eine Nahwärmeleitung ist das Gewächshaus mit dem Heizkraftwerk verbunden und bezieht von dort die gesamte Wärme für den Betrieb der Gewächshausanlage. Die Besonderheit an dieser Verbindung liegt darin, dass die Gärtnerei nicht über das normale Fernwärmenetz versorgt wird. Für die Gärtnerei wird aus dem Rücklauf des regulären Fernwärmenetzes die restliche Wärme ausgekoppelt und über eine Nahwärmeleitung zur Gewächshausanlage transportiert. Das Heizwasser kommt je nach Wärmeverbrauch der anderen Wärmekunden in Neustadt-Glewe mit unterschiedlichen Temperaturen im Gewächshaus an. Eine Vorlauftemperatur von minimal 55 °C ist allerdings garantiert.

Diese Rahmenbedingungen stellen den Gärtner vor eine große Herausforderung, da durch das niedrige Temperaturniveau des Heizwassers nicht auf die herkömmlichen Heizsysteme für Gewächshäuser zurückgegriffen werden kann und die Regelung der Heizung zusätzlich durch die schwankenden Temperaturen im Vorlauf erschwert wird. Allerdings bietet diese Verbindung auch die Chance für den Gärtner, mit einer CO<sub>2</sub>-neutralen Wärmequelle hochwertige Zierpflanzen zu produzieren.

Im Rahmen dieses Projektes wurden das Heizungssystem und die Temperaturführung in der Gewächshausanlage untersucht und verbessert. Außerdem wurde über eine Simulation versucht alternative Strategien für die Temperaturführung zu erarbeiten.

## 1.2 Aufgabenstellung

Oberstes Ziel dieses Vorhabens war, die Gewächshausanlage der Gärtnerei Baumgärtner am Standort Neustadt-Glewe vollkommen CO<sub>2</sub>-neutral zu beheizen und gleichzeitig die Produktion von hochwertigen Zierpflanzen zu gewährleisten. Im Vorfeld dieses Projektes wurde dazu bereits die Ausstattung der Gewächshausanlage entsprechend ausgewählt.

Das nächste Ziel war die messtechnische Erfassung aller Parameter mit Einfluss auf den Wärmeverbrauch und die schrittweise Optimierung und Anpassung der Nutzungsstrategie an die gegebenen Bedingungen. In einer Simulation sollte darüber hinaus der Einsatz einer „Luxuswärmestrategie“ überprüft werden. Dabei soll die vorhandene günstige Energie verstärkt für ein optimiertes Pflanzenwachstum eingesetzt werden und gleichzeitig die vorhandene Energie möglichst optimal genutzt werden. Das Ziel liegt hier in einer höheren Pflanzenqualität oder alternativ in einer Kulturzeitverkürzung. Die Auswirkungen dieser Strategie auf die Pflanzen wurde in Versuchen mit den Kulturen *Pelargonium zonale* und *Euphorbia pulcherrima* an der Humboldt-Universität zu Berlin überprüft. Dieser Teil wird in einem eigenen Bericht behandelt.

Die gewonnenen Daten sollen im nächsten Schritt als Basis für einen weiteren Ausbau der Gewächshausanlage dienen. Dazu soll das vorhandene Wärmepotential des Erdwärme-Heizkraftwerks bei weiterhin CO<sub>2</sub>-neutraler Produktion möglichst weit ausgeschöpft werden.

Als weiteres Ziel sollte die Verbesserung der Energieeffizienz des Heizkraftwerks durch die höhere Wärmeabgabe bewertet werden.

In einem letzten Ziel sollten die gewonnenen Daten auf andere potentielle Standorte mit ähnlichem niedertemperaturtem Wärmeangebot übertragen werden. Dabei sollten unter anderem die höheren Investitionen mit den verfügbaren Wärmemengen und Wärmepreisen verglichen werden.

## 2. Planung und Ablauf der Arbeiten

### 2.1 Planung der Arbeiten

Okt. 2007	Vorbereitung der Messanlagen und Überprüfung der Planungsunterlagen zur Energiebereitstellung und zur Auslegung des Heizsystems
Nov. 2007	Messung der Klimaeigenschaften des Gewächshauses (Lichtdurchlässigkeit D: Lichtmessung innen und außen, Strahlungsumsetzung im GWH: Temperaturmessung innen und außen  Heizen des GWH mit einer definierten Wärmemenge nachts:  Ermittlung von $k'$ des GWH: Temperaturmessung innen und außen  Ermittlung von $k'$ des Energieschirms: Temperaturmessung unter Schirm, über Schirm und außen)
Dez. 2007	Messung der Klimaeigenschaften mit Pflanzenbestand  Erfassung des Wärmeangebots in den Wintermonaten (bis April 2008)
April 2008	Auswertung der Messdaten  Errechnen der einzelnen Klimagrößen
Mai 2008	Erstellen einer Simulationsrechnung mit realen Klimadaten und den Messdaten  Entwicklung einer optimierten Regelstrategie  Auswertung der Wärmedaten des Erdwärmekraftwerks (Wärmeangebot)
August 2008	Umsetzung der Regelstrategie im Gewächshaus
September 2008	Aufbau des Messsystem zur Online-Ermittlung des Pflanzenwachstums  Messung der mikroklimatischen Bedingungen  Vergleichsmessung (herkömmliches Regelsystem – „Luxus-Wärmeversorgung“; bis April 2009)  Ausbauplanung des Gewächshauses auf Basis der Simulationsergebnisse  Überprüfung und weitere Optimierung der Regelstrategie (bis April 2009)
April 2009	Technische und ökonomische Bewertung des Gesamtsystems (Gewächshaus, Heizungsanlage, Wärmebereitstellung) im Vergleich zu einer herkömmlichen Betriebsweise  Bewertung der Energieeffizienzsteigerung des Erdwärmekraftwerks

## Technische und ökonomische Bewertung des Pflanzenbauversuchs „Luxusstrategie“ und Ausarbeitung einer Beratungsempfehlung zur Kulturführung

Juli 2009	Erstellung des Abschlußberichts
September 2009	Projektende

### 2.1 Ablauf der Arbeiten

Mit Beginn des Projektes im Dezember 2007 wurde sofort damit begonnen die Messanlage in den Gewächshäusern der Gärtnerei Baumgärtner zu installieren. Zu diesem Zeitpunkt waren allerdings die Baumaßnahmen noch nicht beendet. In Abteil 2 fehlten noch die Energieschirme und die Verdunkelung. Mit der Pflanzenproduktion war auf einer Teilfläche in Abteil 3 bereits begonnen worden. Durch diese Umstände verzögerte sich die Installation der Messeinrichtungen, da auf eine etwaige Behinderung der Installationsunternehmen Rücksicht genommen werden musste. Ende Januar 2008 waren die notwendigen Instrumente eingebaut und betriebsbereit. Zu diesem Zeitpunkt war bereits die gesamte Fläche mit Pflanzen belegt. Die notwendigen Messungen im leeren Haus ohne Pflanzenbestand konnten dadurch in diesem Winter nicht durchgeführt werden.

Als weiteres Problem stellte sich heraus, dass die zugeführte Wärmemenge in die Gewächshausanlage bei der gegebenen Installation nicht zu begrenzen ist, da die Vorlauftemperatur am Wärmetauscher nicht stabil ist. Außerdem konnte die Verteilung der Wärmemengen auf die fünf Heizkreise nicht definiert werden, da die umlaufenden Wassermengen nicht gemessen werden konnten. Daher konnten die Messungen des Wärmeverbrauchs nur durch gezielte Abschaltung von Heizkreisen durchgeführt werden. Durch diese Maßnahmen kam es allerdings zwangsläufig zu größeren Temperaturunterschieden innerhalb der Anlage, wodurch wiederum verschiedene Variablen (Speichereffekt des Betonbodens, Wärmedurchgang zwischen den Abteilen) eine Größenordnung erreichten, die eine verlässliche Auswertung des Wärmeverbrauchs behinderten.

Da in den folgenden Wochen der Wärmeverbrauch aufgrund von höheren Außentemperaturen bereits stark zurückging, mussten alle Arbeiten mit Bezug zum Wärmeverbrauch auf den Winter 2008/2009 verschoben werden. Da diese Daten auch für folgende Simulationen und die Entwicklung einer optimierten Regelstrategie erforderlich waren, konnten auch diese Arbeiten im Jahr 2008 nicht durchgeführt werden.

Da in Neustadt-Glewe die Regelstrategien auch in Verbindung mit der Luxuswärmeversorgung nicht wie vorgesehen umgesetzt werden konnten, wurden die pflanzenbaulichen Versuche ab September 2008 (Pflanzenwachstum, Messung des Mikroklima) in den Gewächshausanlagen der Humboldt-Universität zu Berlin durchgeführt. Die Ergebnisse hierzu sind in einem eigenen Bericht dargestellt.

Ab Dezember 2008 wurden die Messungen für den Wärmeverbrauch mit verschiedenen Variationen wiederholt. Bei diesen Messungen wurde eine Schwachstelle in der Wärmeverteilung aufgedeckt, die vor der Durchführung weiterer Messungen durch Umbau des Systems behoben werden musste. Als Ergebnis dieser Messungen konnte aber die Regelung bereits auf eine höhere Effizienz umgestellt

werden. Für die weiteren Messungen musste der Umbau der Wärmeverteilung abgewartet werden, wodurch sich die entsprechenden Arbeiten weiter verzögerten.

Nach dem Umbau des Heizungssystems (Sommer 2009) wurden die entsprechenden Messungen zur Temperaturverteilung im Dezember 2009 wiederholt. Im Januar 2010 wurden nach positiver Auswertung der Messergebnisse, die Messungen zum Wärmeverbrauch wieder aufgenommen. Nachdem von der Fachhochschule Osnabrück Messgeräte für die Erfassung von Durchflussmengen zur Verfügung gestellt wurden, konnten die entsprechenden Messungen bis Mitte Februar durchgeführt werden. Anschließend erfolgte die Auswertung der Messdaten und ein Abgleich mit den Wärmeverbrauchsdaten aus dem Heizkraftwerk.

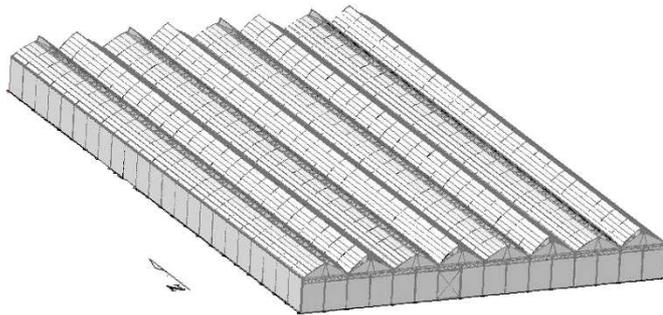
Mit den gewonnenen Ergebnissen wurde anschließend eine Simulation erstellt, um den Energieeinsatz zu optimieren und das entsprechende Erweiterungspotential der Gewächshausanlage zu bestimmen. Die Ergebnisse der Simulation konnten aber nicht mehr in den Gewächshäusern der Gärtnerei überprüft werden und stellen daher nur eine Empfehlung dar.

Aus den Ergebnissen der Simulation wurden anschließend Rückschlüsse auf das Heizkraftwerk und die Kostenstruktur des Produktionsbetriebes gezogen.

### 3. Das Gewächshaus

#### 3.1 Grundkonstruktion

Das in Nord-Süd-Richtung von der belgischen Firma VERMAKO aufgestellte Gewächshaus ist ein achtschiffiges Haus in „Venlo“- Bauweise. Mit einer Länge von 92 m und einer Breite von 51,2 m ergibt sich eine Gesamtgrundfläche von 4710,4 m<sup>2</sup>. Das Gewächshaus lässt sich in vier Abteile (Teilhäuser 1-4) unterteilen. Durch den Binderabstand von 12,8 m sind die Abteile nochmals in zwei Teilflächen untergliedert. Zur Veranschaulichung dient die folgende Graphik (Abb. 1). Die Abmessungen sind in der anschließenden Tabelle (Abb. 2) aufgeführt.



**Abb. 1: Dreidimensionale Grafik des Gewächshauses**

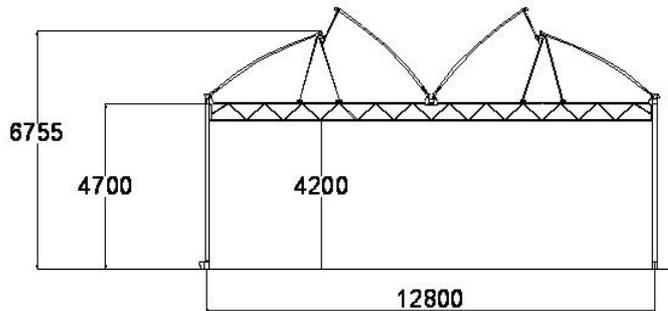
Haus	Abmessungen	Grundfläche	Dachfläche
I (GH1)	25,6m x 48m	1228,8	1682
II (GH2)	25,6m x 44m	1126,4	1548
III-IV (GH3/4)	25,6m x 92m	2355,2	3161

III	II
IV	I

**Abb. 2: Abmessungen des Gewächshauses**

Die 50 cm hohe Unterkonstruktion mit Binderstielen im Dreiecksverband tragen jeweils die vier längsgerichteten Kappen mit einer Breite von 6,4 m und einer Höhe von 2,06 m. Durch die 4,7 m hohe Stehwand resultiert eine Gesamthöhe von 6,76 m (Abb. 3). Die Binder bestehen aus rechteckigen verzinkten Stahlträgern (nach DIN 2394/23895), die auf 2,25 dm<sup>2</sup> breiten Betonsockeln stehen (Abb. 4). Die Dachbögen der Kappen bestehen aus Aluminium-Rundprofilen. Die restlichen Bauteile der Dachkonstruktion wie Rinne sind ebenfalls aus Aluminium gefertigt.



**Abb. 3: Querschnitt durch das Gewächshaus; Maßangaben in mm**



**Abb. 4: Betonsockel als Fundament für die Stahlträger**

### 3.2 Bedachung

Die Bedachung des Gewächshauses besteht aus einer 0,2 mm starken anti-tau beschichteten Doppelfolie aus Polyethylen. Mit Hilfe von Ventilatoren werden die Zwischenräume der beiden Folie aufgeblasen. Diese Luftpolster leisten einen erheblichen Beitrag zur Energieeinsparung (Abb. 5). Zwischen Haus 1 und 4 ist nur eine einfache Folie angebracht. Der Übergang von Haus 1, der auch als Arbeitsraum dient, zu Haus 2 ist ebenfalls nur eine Einfachfolie auf die Schiebetore aufgespannt. Die Abtrennung zwischen Raum 2 und 3 erfolgte mit einer Doppelfolie. Ein Teil der Außenhülle von Haus 1 ist durch ein Auslieferungstor, sowie durch eine Einfahrt und die Eingangstüre unterbrochen. Laut Hersteller ergibt sich für die diffuse Lichtdurchlässigkeit der Folie ein Wert von 92 %.



**Abb. 5: Vorrichtung zum Aufblasen der Doppelfolie**

### 3.3 Ausstattung

Für die detaillierte Beschreibung der Innenausstattung wird in einen Produktions- und Servicebereich unterschieden. Als Aufzuchttraum dienen die Teilhäuser 2-4. Das Haus 1 wird als Materiallager und Arbeitsraum genutzt. Außerdem wird dort zum Teil überständige Ware zwischengelagert.

#### 3.3.1 Grundausrüstung

##### 3.3.1.1 Aufzuchtfläche und Bewässerungssystem

Die Aufzuchtflächen in Haus 2 und Haus 3/4 sind identisch aufgebaut. Der 12 cm starke Betonboden stellt eine Besonderheit dar. Da er zugleich das Bewässerungssystem als auch einen Teil der Heizung beinhaltet. Kennzeichnend für dieses geschlossene Bewässerungssystem ist ein großflächiges Anstauverfahren. Mittels Vorratspumpen wird das Wasser aus dem Vorratsbehälter in die einzelnen Abteile gebracht. Der Wasseraustritt erfolgt über Gullys. Auf einer Länge von 44 m sind 5 Stück im Beton verlegt. Damit das Wasser nicht ablaufen kann wurden am Rand 5 cm breite und 8 cm hohe Sockelsteine im Binderabstand verlegt. Die speziell geglättete Betonoberfläche mit einem Gefälle von 1 % gewährleistet einen sicheren Abtransport des Wassers in die Ablaufrinne (Drainage). Es verläuft eine in Längsrichtung pro Binderabteil. Die Anstauhöhe liegt zwischen 1-2cm, ist davon abhängig ob die Topfpflanzen direkt am Boden aufgestellt sind oder sich in Plastiktrays befinden. Das anschließende Bild zeigt die Aufzuchtfläche mit Drainagerinne im Haus 3/4 (Abb. 6).



**Abb. 6: Aufzuchtfläche im Haus 3/4**

### 3.3.1.2 Haus 1(Arbeitsraum)

Wie bereits erwähnt befindet sich an der Außenhülle von Haus 1 der Eingangsbereich und die Zufahrt. Deshalb wurde der Boden mit Betonpflastersteinen ausgelegt. Für den Warenverkehr ist ein weiteres Rolltor mit Laderampe vorhanden, deren Zufahrt im Außenbereich noch nicht fertiggestellt ist. Im Arbeitsraum wurde ein gemauertes Gebäude erstellt, in dem das Büro und die sanitären Anlagen untergebracht sind. Im Büro ist auch der Klimacomputer untergebracht.

### 3.3.2 Heizungssystem

Der Gartenbaubetrieb Baumgärtner bezieht seine Heizungswärme vom nur 200 m entfernten Erdwärmekraftwerk. Für den Betrieb wurde eine Wärmetrasse geschaffen, womit die Energie aus der Rücklaufleitung des Wärmenetzes entnommen wird. Die Temperatur kann zwischen 55°C und 70°C variieren, es darf aber Wärme bis zu einem Temperaturniveau von 35°C entnommen werden.

Die Zentrale des Heizungssystems befindet sich im Arbeitsraum. Hier erfolgt die Heißwasserzuleitung durch ein Eingangsrohr, das direkt an den Wärmetauscher gekoppelt ist. Der Abtransport des Kaltwassers verläuft durch das parallel angebrachte Ausflussrohr. (Abb. 7) Die Durchflussmenge wird auf der angebrachten Wasseruhr an der Hauptleitung festgehalten, die vom Wärmetauscher zum Verteilersystem geführt wird. Durch die Niedertemperaturwärme muss die Wärmetauschfläche vergrößert werden, um den Pflanzen ein ausreichend hohes Temperaturniveau bieten zu können. Deshalb sind in diesem Betrieb mehrere Heizungssysteme vorhanden.

Insgesamt existieren fünf separate Heizkreise. In den beiden Produktionsbereichen sind jeweils ein Heizkreis für die Bodenheizung und einer für die Luftheritzer. Die Rohre für Vor- und Rücklauf tragen außerdem zur Beheizung der Arbeitshalle bei. Die Wasserzufuhr in die einzelnen Kreisläufe wird mit Hilfe von fünf Wasserpumpen und Mischern bereit gestellt, die normalerweise durch den Klimacomputer gesteuert werden, aber auch manuell bedient werden können. Der Verlauf der Heizleitungen sowie die zusätzlichen Rohrwindungen im Stehwandbereich, als auch das Verteilersystem sind in den Graphiken (Abb. 11; 12; 13) dargestellt. Der Heizkreis für die Luftheritzer in der Arbeitshalle arbeitet mit einer unregelmäßigen Vorlauftemperatur. Hier wird die zugeführte Wärmemenge nur über die Laufzeit der Ventilatoren gesteuert.



**Abb. 7: Einführung der Fernwärmeleitung ins Gewächshaus**

### 3.3.2.1 Die Bodenheizung

Eine sehr hohe Wärmetauschfläche stellt der Boden dar, deshalb wurden im gesamten Produktionsbereich ca. 4 km Plastikschläuche verlegt. Die Polyethylenschläuche mit einem Außendurchmesser von 20 mm (Innendurchmesser: 15,6 mm) sind fest im Beton in einem Abstand von 15 cm in parallel verlaufenden Linien nach dem Tichelmannprinzip eingegossen. (Abb. 8) Dadurch wird ein gleichmäßiger Druck in allen Leitungen unabhängig von der Entfernung zur Pumpe gewährleistet. Eine zusätzliche Wärmeabgabe erfolgt über die Zuleitungen zum Verteilersystem.



**Abb. 8: Bodenheizung nach dem Tichelmannprinzip**

Durch die Bodenheizung wird ein schnelles Abtrocknen des Bodens nach der Bewässerung (Flutung) sicher gestellt. Ein optimales Klima wird durch die aufsteigende Wärme vom Boden, d.h. unmittelbar dem Pflanzenbestand zugefügte Energie, erzielt. Mit diesem Prinzip soll auch 2/3 des Wärmebedarfs in den Produktionshäusern gedeckt werden. Die Fußbodenheizung stellt somit die Grundversorgung mit Energie im Heizsystem der Anbauflächen dar. Zu beachten ist, dass bestimmte Zeitintervalle notwendig sind, um die Temperatur zu steigern oder abzusenken. Durch das träge System der Bodenheizung ist ein zweites System für Spitzenlastzeiten notwendig.

### 3.3.2.2 Die Luftherhitzer

Die restliche Energie wird dem Pflanzenbestand mittels Luftherhitzern zugeführt. Je Produktionsabteil sind zwei Luftherhitzer (LH-100-3) unter dem Gitterzug des Venlodaches angebracht. Die Drehstrommotoren (3x400 V) der Luftherhitzer garantieren den Wärmestrom in die perforierten Polyethylenschläuche (Abb. 9 und 10), die eine möglichst gleichmäßige Energieverteilung ermöglichen sollen. Diese verlaufen in Längsrichtung in der Bindermitte in 3 m Höhe über dem Pflanzenbestand. Die Wärmezufuhr wird zum einen durch die Vorlauftemperatur geregelt und zum anderen über fünf Schaltstufen des Elektromotors der Ventilatoren, die allerdings manuell bedient werden müssen. Die elektrischen Kennzahlen der Luftherhitzer sind der aufgeführten Tabelle (Tab. 1) zu entnehmen. Die vier Luftherhitzer (LH 100-4) im Arbeitsraum unterscheiden sich durch die Kennzahlen. Außerdem sind dort keine Lufttransportschläuche installiert.



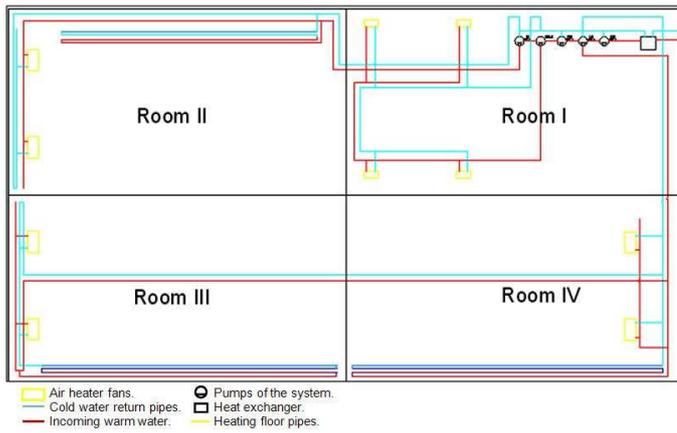
Abb. 9: Luftheritzer



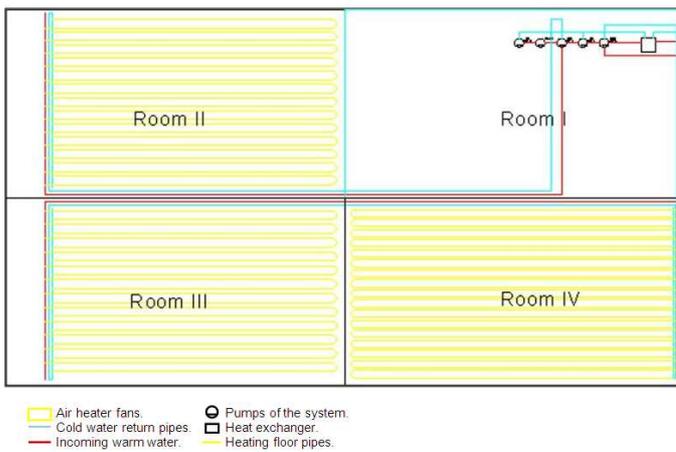
Abb. 10: Wärmeverteilung über die Polyethylenschläuche

<i>Typ</i>	<b>LH100-3</b>		<b>LH100-4</b>	
<i>Drehzahl [U/min]</i>	900	700	900	700
<i>Luftstrom [m<sup>3</sup>/h]</i>	8300	6000	7700	5600
<i>Stromstärke [A] (3 x 400 V)</i>	1,7	1,1	1,7	1,1
<i>Motorleistung [kW] (3 x 400 V)</i>	0,45	0,15	0,45	0,15
<i>Wasserinhalt [Liter]</i>	3,5		5,5	
<i>Maximale Wassertemperatur [°C]</i>	140		140	
<i>Nenndruck [bar]</i>	16		16	

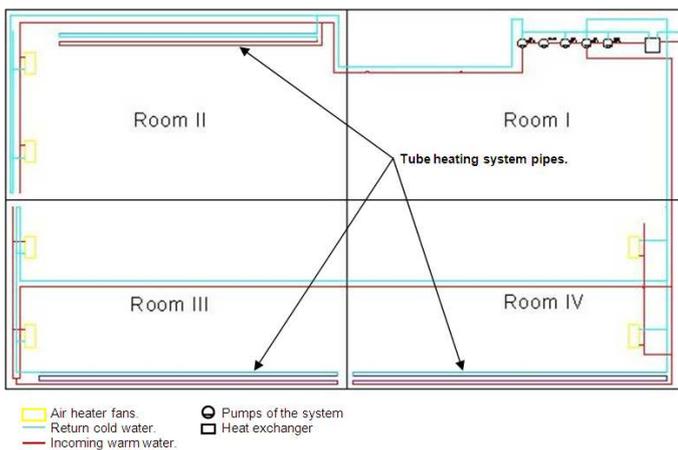
Tab. 1: Elektrische Kennzahlen der Luftheritzer



**Abb. 11: Ansteuerung und Anordnung der Luftheritzer in den Gewächshäusern (Herstellerzeichnung)**



**Abb. 12: Ansteuerung und Verlegung der Bodenheizungsleitungen (Herstellerzeichnung)**



**Abb. 13: Anordnung der Stehwandheizung in den Häusern 2,3 und 4 (Herstellerzeichnung)**

### **3.3.3 Belichtungssystem**

In Haus 2 ist seit Mitte 2008 ein Kunstlichtsystem installiert. In vier Reihen sind dazu jeweils 15 Leuchten mit 600W Na-Dampflampen angebracht. Diese sind in 6 Kreisen schaltbar. Die ersten 10 Leuchten jeder Reihe vom Arbeitsraum aus bilden dazu jeweils einen Schaltkreis und die letzten 5 Leuchten vor der Giebelseite von jeweils zwei Reihen sind zu einem Schaltkreis zusammengefasst.

### **3.3.4 Energieschirme**

Das Haus 3/4 ist mit einem einfachen Gewebe-Energieschirm der Firma Reimann ausgestattet. Im Haus 2 ist zusätzlich zu diesem Energieschirm noch eine separat steuerbare Verdunklung installiert. Diese schließt auch alle Seitenwände lichtdicht ab und bildet damit eine zusätzliche Isolierung. Allerdings ist die Giebelseite der Verdunkelung noch nicht an die Automatisierung angeschlossen. Diese Seite muss von Hand bedient werden und steht daher meistens offen.

## 4. Forschungsarbeiten

Obwohl die Energie relativ kostengünstig von Geothermalwerk bezogen werden kann, steht die Energieeinsparung im derzeitigen Produktionsablauf mit an erster Stelle. Der Wärmebedarf des Gewächshauses soll durch die aufgeblasene Doppelfolie möglichst gering gehalten werden. Durch den Einsatz von Energieschirmen werden gerade bei tiefen Außentemperaturen die Lastspitzen gesenkt. Die Anwendung gezielter Regelstrategien kann die Grundlast im Heizungshaushalt entscheidend senken und weitere Energiekapazitäten für eine Gewächshausenerweiterung schaffen. Dazu ist es notwendig, die Wärmeströme in diesem Gewächshaus zu erfassen.

Die Bestimmung der klimatischen Gewächshauseigenschaften wird durch folgende Größen bestimmt:

- Wärmeverbrauchsbeiwert des Gewächshauses mit und ohne Energieschirm
- Lichtangebot im Gewächshaus (Lichtdurchlässigkeit)
- Wärmespeicherungseffekt des Bodens

Die Erfassung der Messdaten muss sowohl in leeren Gewächshäusern als auch in Häusern mit Pflanzenbestand erfolgen, da durch die Transpiration der Pflanzen Wärme verbraucht wird.

### 4.1 Messdatenerfassung

Für die Berechnung der Kennzahlen sind bestimmte Messdaten notwendig. Um einen bestimmten Umfang an Messwerten aufzeichnen zu können, erfordert es an dieser Stelle den Einsatz eines geeigneten Datenerfassungssystems.

#### 4.1.1 Messstation und Datalogger

Um einen ausreichenden Umfang an Daten gewinnen zu können wird ein vom Institut für Biologische Produktionssysteme (Fachgebiet Biosysteme und Gartenbautechnik) entwickelter Datalogger verwendet. Der Datalogger ist für eine Basis von drei „Muxcards“ ausgelegt mit jeweils 14 Eingangskanälen. In diesem Fall reichen zwei installierte Karten aus, die 28 Messstellen ermöglichen. Die Anschlüsse mit den Klemmstellen sind in einer isothermischen Box untergebracht, die die Kontakte vor Einstrahlung schützt und somit für eine relativ konstante Innentemperatur in der Kiste sorgt. Die isothermische Box ist direkt mit dem Datalogger gekoppelt.

Die Daten können auf dem Datalogger direkt aufgezeichnet und abgespeichert werden und anschließend extern bearbeitet werden. Für die Überwachung und Auswertung der Daten ist die Kopplung an einen PC über eine serielle Schnittstelle sinnvoll. Die online-Ausgabe der Daten am Bildschirm erfolgt mit dem Programm Procomm Plus.

Für die einzelnen Messpunkte wurde mit Hilfe von Procomm ein Messstellenplan erstellt, der die Ausgabewerte identifiziert. Der Abstand der Messdurchläufe wird in der Speicherdatei festgelegt. Die schnellst mögliche Initialisierung ist alle 12 Sekunden möglich, da für eine „Muxcard“ 6 Sekunden benötigt werden. Für die Speicherung der Daten wurde in der Speicherdatei ein Zeitintervall von 20 Minuten gewählt, so ergeben sich für jede Stunde drei gemittelte Werte. Weitere Einstellungen wie Anzahl der Muxkarten sowie Datum und Uhrzeit werden ebenfalls hier vorgenommen. Für diesen Wählmodus ist der Datalogger in der Lage 13 Tage am Stück aufzuzeichnen. Danach müssen die

Daten mit Hilfe von Procomm heruntergeladen werden und der Datensatz am Logger gelöscht werden.

Das gesamte Equipment ist in einer aus Holz gebauten Messstation untergebracht, in der sich auch die Stromversorgung für PC und Datalogger befindet.

#### 4.1.2 Temperaturmessung

Für die Temperaturmessung werden Thermoelemente eingesetzt, die direkt in der isothermischen Box an die entsprechenden Anschlüssen geklemmt werden. Dabei handelt es sich um 0,5mm starke k-Typ NiCr-Ni-Thermoelemente (Norm EN 60584), die mit PVC isoliert sind. Als Feuchtigkeitsschutz sind die Schweißstellen mit Zweikomponentenkleber ummantelt und ein Schrumpfschlauch angebracht. Im Messstellenplan muss der Modus 5 für Thermoelemente gewählt werden, somit ist eine Ausgabe von +/- 220 °C mit einer Auflösung von 1/10 möglich.

#### 4.1.3 Luftfeuchtemessung

Zur Messung der Luftfeuchte dient das Psychrometer. Es besteht aus zwei Thermoelementen. Das Eine misst die feuchte Luft und das Andere die trockene Luft. Als Strahlungsschutz dient ein Aluminiumrohr, in dem, neben den Thermoelementen, am oberen Ende ein Ventilator angebracht ist. Durch die vom Lüfter transportierte Luft wird, entsprechend ihres Wassergehaltes, Wasser vom Docht des Feuchtefühlers aufgenommen. Durch die Verdampfung wird Energie verbraucht, was zu einer Abkühlung des Feuchtemessfühlers führt. Die relative Luftfeuchte wird durch die Temperaturdifferenz der beiden Fühler (trocken und feucht) ermittelt. Der am Feuchtefühler angebrachte Docht bezieht destilliertes Wasser aus einem Vorratsbehälter, der neben dem Strahlungsschutzrohr angebracht ist.

#### 4.1.4 Einstrahlungsmessung

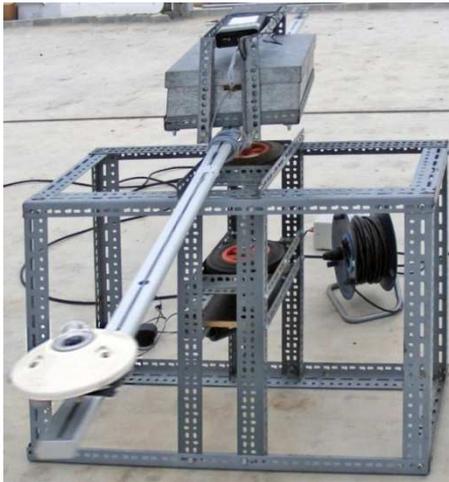
Die Messung der Globalstrahlung erfolgt mit einem Solarimeter Typ CM 11 von der Firma Kippzonen Holland, was auf der ISO 9 9060 basiert. Durch den spektralen Messbereich von 305-2800 nm wird die gesamte von der Sonne abgegebene Strahlung erfasst. Das Gerät belegt ebenfalls zwei Anschlüsse, das bedeutet einen Eingangskanal am Datalogger. Der Modi 3 ermöglicht die Ausgabewerte in mV im Bereich von +/- 10 mV. Die weiteren technischen Daten sind der Tabelle zu entnehmen (Tab. 2).

Bestrahlungsstärke	0 - 1400 W/m <sup>2</sup>
Empfindlichkeit	4 - 6 µV/W/m <sup>2</sup>
Spektralbereich	305 – 2800 nm
Nichtlinearität	± 0,6 % < 1000 W/m <sup>2</sup>
Impedanz	700 - 1500 Ohm
Zeitkonstante	1/e 4s; 99% 24s
Einsatztemperatur	- 40 - + 80°C
Sensortyp	Thermosäule

**Tab. 2: Technische Daten des Solarimeters**

Für die Messung der Einstrahlung innerhalb des Gewächshauses stellen Schattenwurf und andere durch Bauteile hervorgerufene Effekte ein Problem dar, die eine punktuelle Messung nicht sinnvoll erscheinen lassen. Selbst durch eine höhere Anzahl ausgewählter Messpunkte lässt sich keine vernünftige Situation ermitteln. Deshalb wurde für die Lichtmessung im Gewächshaus ein Strahlungsintegrator entwickelt, der mit einem rotierenden Solarimeter arbeitet. Das Pyranometer

CM 11 wurde dazu auf eine Schiene(Flügel) montiert, deren Abstand zur Rotationsachse freigewählt werden kann. Der Flügel mit der festverbundenen Rotationsachse wird durch zwei Lager geführt. Der Antrieb erfolgt über einen kleinen elektrischen Motor, dessen Antrieb direkt mit der Achse verbunden ist. Die Geschwindigkeit der Rotation wird mit Hilfe der Spannung am Netzgerät reguliert. Der Tragerahmen und die Halterung der Messbox und des Motors, der auf einer Pressholzplatte montiert ist, bestehen aus beschichteten oder verzinkten leichten Eisenschienen. Der Flügel ist eine Aluminiumschiene, somit ist das relativ leichte Gerät flexibel einsetzbar. In der Halterung für die Messbox ist zusätzlich ein Solarpanel angebracht, das über die Dauer der Messung dem Akku des Dataloggers eine ausreichende Spannungsversorgung liefert. (Abb. 14) (Tab. 3)



**Abb. 14: Strahlungsintegrator**

Rotordurchmesser	2,8 m
Abmessungen (L/B/H)	1 m / 0,43 m / 0,7 m
Drehzahl	3 – 4 [U/min]
Sensor	Pyranometer CM 11

**Tab. 3: Technische Daten zum Strahlungsintegrator**

#### 4.1. 5 Zähler für Durchflussmenge

Zur Messung der Heizwassermenge wird eine analoge Wasseruhr verwendet, die unmittelbar hinter dem Wärmetauscher in das Heizsystem eingebaut ist. Diese Wasseruhr verfügt über einen Anschluss zur digitalen Aufzeichnung der gemessenen Werte. Über eine Zählerkarte ist die Wasseruhr mit dem Datalogger verbunden. Für jeweils 100 Liter Wasser wird ein Signal ausgegeben.

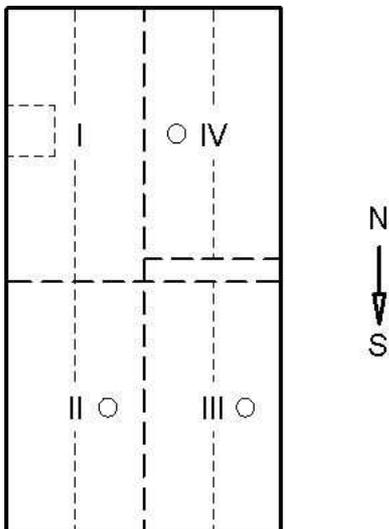
#### 4.1. 6 Messpunkte

Für die Erfassung von Energieströmen müssen mehrere Messfühler angebracht werden, die die unterschiedlichen Temperaturen im Gewächshaus erfassen. Für die Erfassung der Bodentemperaturen wurden im Haus 2 und 4 jeweils zwei Thermoelemente mit Silikon und mit einem metallenen Schutzdeckel am Boden fixiert. Die Vorlauf- und Rücklauftemperaturen der Heizungsrohre werden unmittelbar am Eintritt in die einzelnen Häuser gemessen. Die Fühler wurden mit Isoliermaterial umgeben und mit Klebeband umwickelt(Abb. 15). Das gilt auch für die Thermoelemente die den Vor- und Rücklauf des Gesamtsystems messen. Für die Messung der Lufttemperatur im Dach wurden im Haus 2 und 4 jeweils ein belüfteter Fühler angebracht. Auf dieselbe Art und Weise wird auch die Temperatur vom Arbeitsraum bestimmt.



**Abb. 15: Anbringung der Messfühler**

Das Solarimeter für die äußere Globalstrahlung wurde in 7 m Höhe an den Masten der Wetterstation des Klimacomputers befestigt, der sich ca. 12 m neben dem Eingang befindet. Für die Einstrahlung im Gewächshaus wurde der Strahlungsintegrator in den Häusern 2, 3 und 4 aufgestellt. Die folgende Skizze (Abb. 16) zeigt die Messpunkte.



**Abb. 16: Grundriss mit den eingetragenen Messpunkten**

Für die Feuchte- und Temperaturmessung wurde jeweils in Haus 2 und 3 ein Psychrometer installiert, das sich an einer Kette über dem Luftfeuchtemessgerätes des Klimacomputers in etwa 1m Höhe befindet.

## 4.2 Bestimmung des Wärmeverbrauchscoeffizienten

### 4.2.1 Allgemeines

Die Berechnung des Wärmeverbrauchscoeffizienten  $u'$  erfolgt über folgende Formel:

$$u' = \frac{Q}{A_H \cdot (t_i - t_a)}$$

Dabei stellt  $Q$  die gesamte zugeführte Wärmemenge zum betrachteten System dar,  $t_i$  und  $t_a$  sind die Innentemperatur und die Außentemperatur die an der Hüllfläche  $A_H$  anliegen. Bei unterschiedlichen angrenzenden Bereichen müssen die Teilflächen einzeln berücksichtigt werden. Die zugeführte Wärmemenge wird aus der durchfließenden Wassermenge, der spezifischen Wärmekapazität von Wasser und der Temperaturdifferenz aus Vorlauf und Rücklauf berechnet.

Nach J. MEYER (1981, Gartenbautechnische Informationen, Heft 10: „Bewegliche Energieschirme“; Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover) soll die zugeführte Wärmemenge weitgehend konstant gehalten werden, um regeltechnisch bedingte Messfehler gering zu halten. Dazu muss einerseits die umgewälzte Wassermenge durch Feststellen der Mischregler fixiert werden und andererseits die Vorlauftemperatur von Seiten der Wärmequelle konstant gehalten werden.

Für die Bestimmung der Wärmemenge steht in der Gewächshausanlage ein Wassermengenzähler zur Verfügung, der die Heißwassermenge direkt nach dem Wärmetauscher misst. Dieses Heißwasser wird über vier Mischer in die entsprechenden Heizsysteme der beiden Produktionsabteile verteilt. Die Luftheizer in der Arbeitshalle werden direkt –ohne Mischer– mit dem Heizwasser versorgt. Da die Wasseruhr nur die Gesamtmenge an Heißwasser bestimmt, ist es nicht möglich, wenn mehrere Heizsysteme betrieben werden, die zugeführten Wassermengen der einzelnen Systeme zu bestimmen. Um die umgewälzte Wassermenge eines einzelnen Heizsystems über die vorhandene Wasseruhr zu bestimmen, muss der Mischer vollständig geöffnet sein. Dies ist allerdings nur bei den Luftheizern möglich. Die beiden Bodenheizungen dürfen nicht mit zu hohen Vorlauftemperaturen betrieben werden, da es sonst möglicherweise im Betonboden zu hohen Spannungen und daher zur Bildung von Rissen kommen kann. Daher können die beiden Mischer für die Bodenheizung nicht vollständig geöffnet werden. Aus dem gleichen Grund darf auch die Vorlauftemperatur für die Bodenheizung nicht zu stark schwanken. Als Grenzwert sind 5°C pro Tag vorgegeben. Dieser Punkt erschwert eine kurzfristige Versuchsanstellung, da es mehrere Tage dauert, bis die Bodenheizung entweder vollständig heruntergefahren oder aber voll einsatzbereit ist.

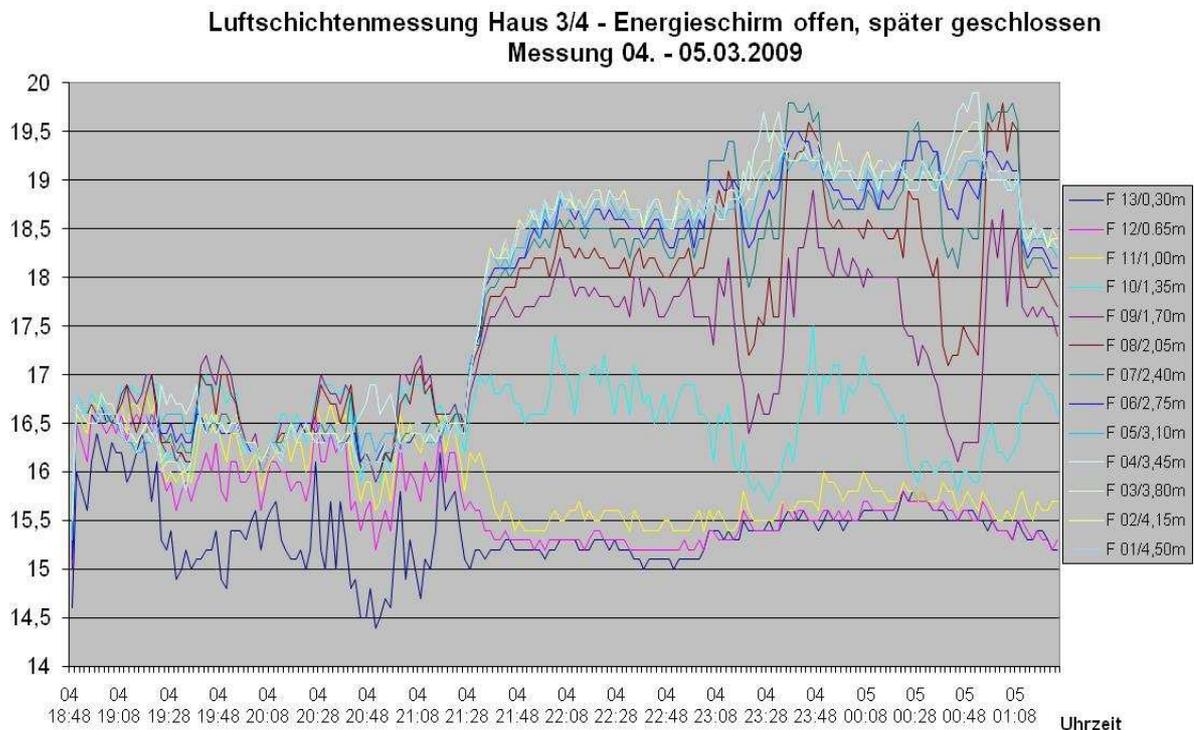
Die ersten Versuche zur Bestimmung der Wärmemengen wurden daher durchgeführt, indem alle Systeme, bis auf die Luftheizer in einem Abteil, abgeschaltet wurden. Die Ergebnisse bei diesen Messungen waren allerdings sehr unbefriedigend, da es zu einigen Wechselwirkungen (Abkühlen des Betonbodens, Temperaturunterschied zwischen den Abteilen mit entsprechendem Wärmeübergang, etc.) kam, die zum Teil nicht näher beziffert werden konnten. Die genaueren Beschreibungen wurden bereits im Zwischenbericht dargestellt.

### 4.2.2 Gradientenmessung

Bei der Auswertung einer Wärmeverbrauchsmessung stellte sich heraus, dass der berechnete  $u'$ -Wert für das Abteil 3/4 bei geschlossenem Energieschirm höher lag, als ohne Energieschirm. Nach einer wiederholten Überprüfung der Messdaten wurde festgestellt, dass die Temperatur im

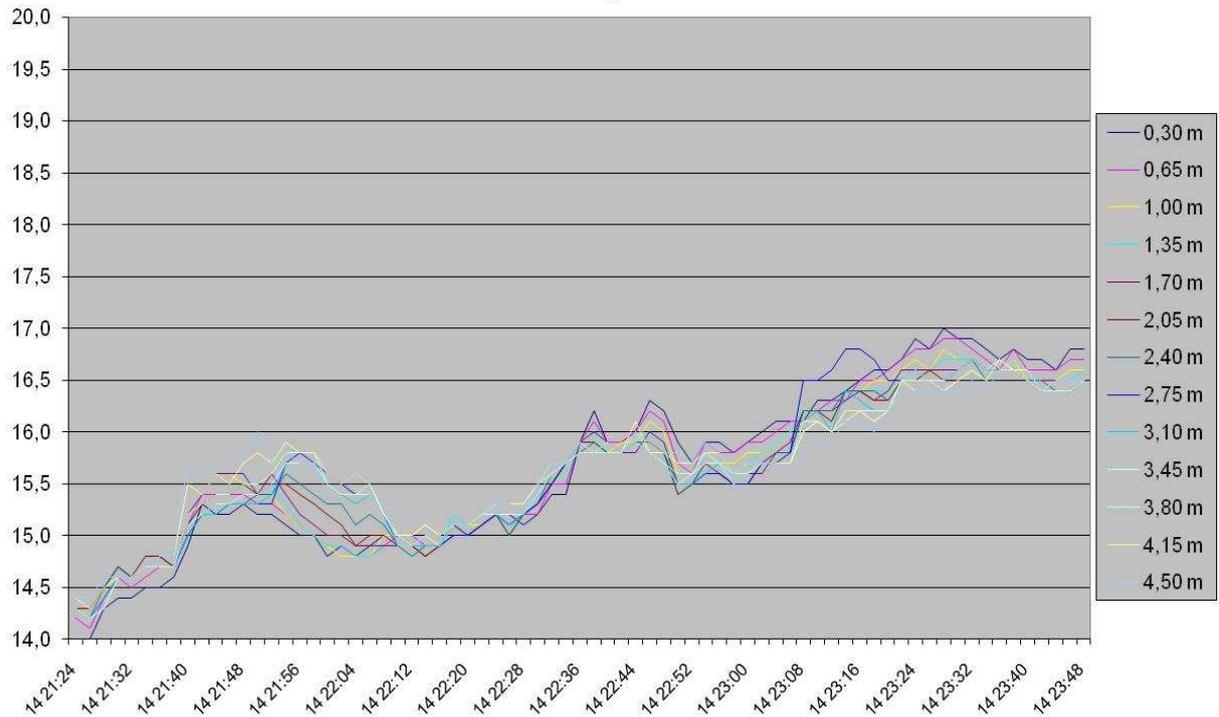
Dachraum über dem Energieschirm zeitweise sogar etwas höher lag als die Temperatur im Pflanzenbereich. In einem funktionierenden System sollte aber diese Temperatur je nach Wirkungsgrad des Energieschirms zwischen der Innentemperatur (Pflanzenbestand) und der Außentemperatur liegen, wodurch auch der Einspareffekt der Energieschirme erzielt wird. Als mögliche Erklärung wurde ein Wärmestau direkt unterhalb des Energieschirmes angenommen. Im März 2009 wurde deshalb zur Überprüfung eine Messung der Temperaturen in verschiedenen Höhen durchgeführt. Dazu wurden an einem Mast 13 Temperaturfühler im Abstand von jeweils 35 cm angebracht um den Raum bis zum Energieschirm zu erfassen. Zusätzlich wurde über das bestehende System die Dachtemperatur erfasst. Die Messung wurde an zehn verschiedenen Punkten über die gesamte Breite des Abteils durchgeführt. An jedem Messpunkt wurden für 16 Minuten in Zwei-Minuten-Intervallen die Durchschnittstemperaturen erfasst. Auf diese Weise sollte sichergestellt werden, dass sich die Luftverwirbelungen durch das Umstellen des Mastes wieder beruhigen und sich die Schichtung wieder einstellt. Die Mischer für die Luftheizer wurden für die Dauer der Messung vollständig geöffnet, damit die maximale Vorlauftemperatur erreicht wird. Die Bodenheizung konnte leider nicht vollständig abgestellt werden und lief daher zumindest mit sehr niedriger Temperatur.

In der ersten Messung wurden die Luftheizer auf Gebläsestufe 3 von 5 betrieben, wie sie auch von Hr. Baumgärtner genutzt wurden. Bei geschlossenem Schirm lagen die Temperaturen im unteren Bereich bis zu einer Höhe von etwa 1,70 m sehr eng zusammen. Die Werte für die Höhe von 2,05 m waren etwa um 1°C erhöht. Für die höher gelegenen Messstellen lagen die Werte insgesamt wieder enger zusammen, waren allerdings gegenüber den unteren Messstellen um etwa 4°C erhöht. Somit ergibt sich ein eindeutiges Bild der Situation. Die warme Luft steigt direkt nach dem Austritt aus den Folienschläuchen nach oben und sammelt sich unterhalb des Energieschirms.



**Abb.17: Luftschichtenmessung im Haus 3/4, bei offenem und dann geschlossenem Energieschirm, bei Gebläsestufe 5**

Luftschichtenmessung Haus 3/4 - Energieschirm geschlossen  
Messung am 14.12.2009



**Abb.18: Luftschichtenmessung im Haus 3/4, bei geschlossenem Energieschirm, bei Gebläsestufe 5, nach Absenkung der Folienschläuche**

In der zweiten Messung wurden die Luftheizer auf Gebläsestufe 5 betrieben. In Abbildung 17 sind die Messwerte abgebildet. In der ersten Hälfte der Messung war der Schirm geöffnet, danach geschlossen. Sowohl bei geöffnetem, als auch bei geschlossenem Schirm wurde an den 10 Messpunkten über die gesamte Breite des Abteils gemessen. Bei offenem Schirm liegen die Messwerte etwa 2°C auseinander, wobei der Wert für den Pflanzenbestand (0,30 m) deutlich niedriger liegt, als die restlichen Werte. Dies lässt darauf schließen, dass die Luft am Dach abkühlt und dann nach unten sinkt.

Nach dem Schließen des Energieschirms bilden sich sehr schnell stabile Luftschichten heraus. Hier liegen die Werte der drei untersten Messstellen (0,30-1,00 m) sehr eng zusammen. Der Fühler 1,35 m liegt schon deutlich darüber. Die höher gelegenen Messfühler messen etwa 3-4°C höhere Temperaturen. An zwei Stellen sind die Werte der oberen Messfühler weiter auseinandergezogen. An diesen Messpunkten stand der Mast im direkten Luftstrom der Folienschläuche.

Im Vergleich zur Messung auf Gebläsestufe 3 konnte die Warmluft mit Stufe 5 deutlich weiter nach unten gebracht werden. Aber dennoch ist diese Höhe für den Pflanzenbestand zu weit entfernt.

Im Sommer 2009 wurden die Folienschläuche auf eine Höhe von etwa 3 m herabgelassen. Im Dezember 2009 wurde die Messung der Temperaturschichtung wiederholt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 18 dargestellt. Die Werte aller 13 Messfühler liegen bei dieser Messung sehr eng zusammen. Der Unterschied beträgt meist nicht mehr als 0,5 °C. Nur in unmittelbarer Nähe zu den

Folienschläuchen gibt es wiederum Verschiebungen. Bei dieser Messung war die Bodenheizung in der einen Hälfte des Abteils vollständig abgeschaltet, in der anderen Hälfte war sie bei niedriger Temperatur in Betrieb. Im Diagramm kann man erkennen, dass die Werte der unteren Messfühler in der Mitte des Diagramms ansteigen und sich über denen der höheren Messfühler anordnen. Die Temperaturschichtung konnte somit durch die Erhöhung der Gebläseleistung und durch die Absenkung der Folienschläuche auf ein akzeptables Maß reduziert werden.

#### 4.2.3 Wärmeverbrauchsmessung

Im Januar 2010 wurden von der Fachhochschule Osnabrück vier Durchflussmengenmesser installiert, die mittels Ultraschall die umgewälzten Wassermengen in den vier Heizsystemen der Produktionsabteile bestimmen konnten. Mit der Messung der Gesamtwassermenge durch die bereits vorhandene Wasseruhr, konnten dadurch die zugeführten Wärmemengen jedes einzelnen Heizsystems errechnet werden.

Nach der Installation der Durchflussmengenmesser wurde die Verbrauchsmessung wiederholt. Die Produktionsabteile waren zu diesem Zeitpunkt noch weitgehend leer, da nach dem Abverkauf der Weihnachtssterne noch nicht mit der Produktion der Pelargonien begonnen wurde. Daher war das Heizsystem der Gewächshausanlage auch noch nicht vollständig hochgefahren. Die Fußbodenheizung lag zu diesem Zeitpunkt bei einer Temperatur von 25°C im Vorlauf. Daraus ergab sich eine mittlere Bodentemperatur von ca. 17°C. Die Außentemperatur lag bei etwa -3°C.

In der ersten Nacht wurden die Wärmeverbräuche bei geöffnetem Energieschirm gemessen. Die Mischer der einzelnen Heizkreise wurden auf dem Stand vom Abend fixiert und die ganze Nacht konstant laufen gelassen. Dadurch ergaben sich die folgenden Temperaturverläufe im Haus 2. In der Abteilung 3/4 waren die Temperaturverläufe vergleichbar.

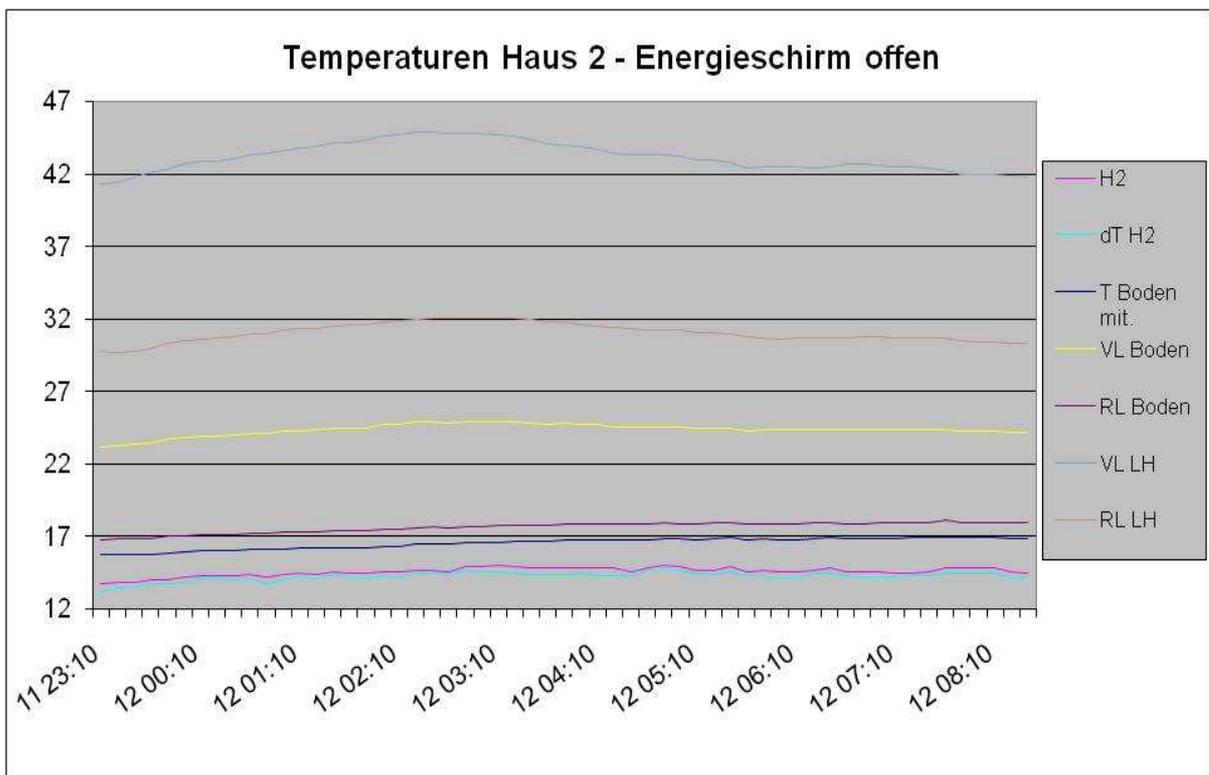
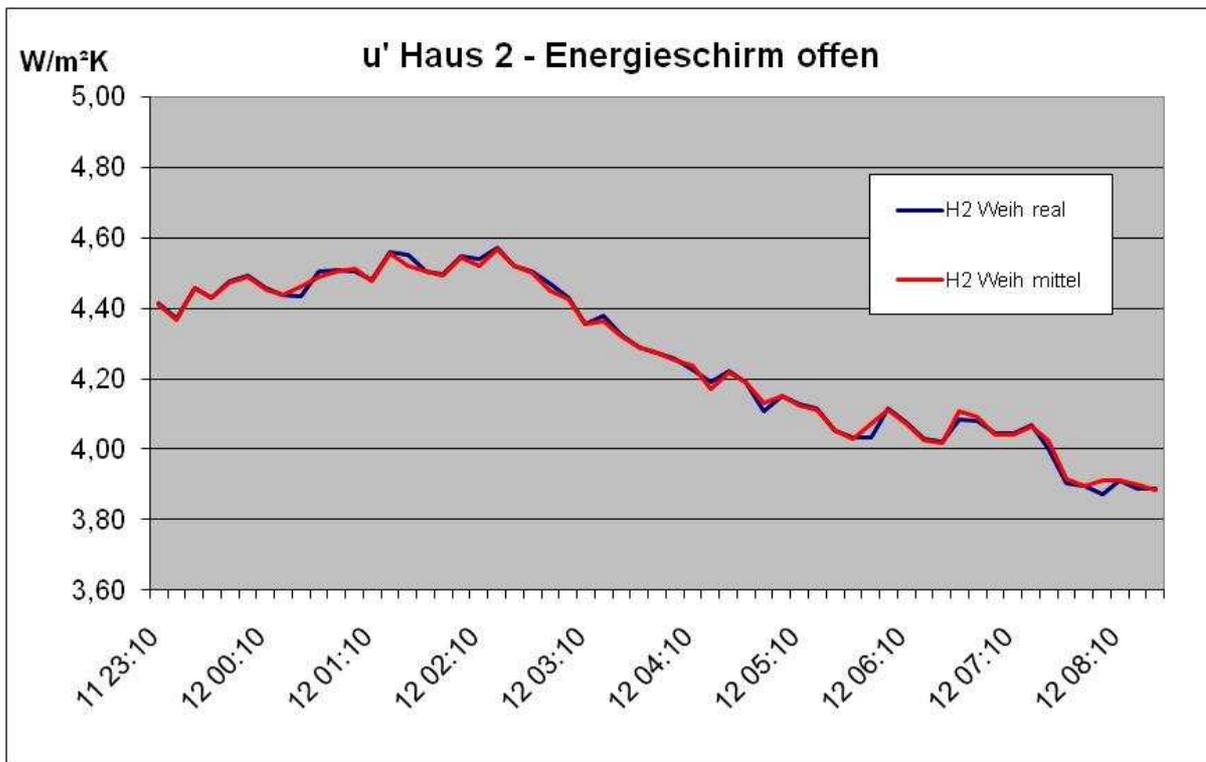


Abb. 19: Temperaturen im Haus 2 bei geöffnetem Energieschirm

Für den Wärmeverbrauchsbeffizient  $u'$  ergibt sich daraus der folgende Verlauf.



**Abb. 20: Verlauf des Wärmeverbrauchsbeffizienten  $u'$  im Haus 2 bei geöffnetem Schirm**

In Abbildung 19 sieht man den Verlauf verschiedener Temperaturwerte. Der Graph  $H2$  stellt die Innentemperatur dar,  $dT_{H2}$  ist die Dachttemperatur,  $T_{Boden\ mit}$  ist die mittlere Bodentemperatur,  $VL$  und  $RL$  bezeichnen jeweils den Vor- bzw. den Rücklauf von Bodenheizung und Luftheizern ( $LH$ ). Der leicht gebogene Verlauf der einzelnen Kurven ist auf die Veränderungen der Temperaturen aus der Fernwärmeleitung zurückzuführen. Ab ca. 22.00 Uhr sinkt der Wärmeverbrauch bei den anderen Kunden des Heizwerks, wodurch das Temperaturniveau für die Gärtnerei ansteigt. In den Morgenstunden sinkt die Temperatur wieder entsprechend ab. Diese Temperaturveränderungen führen wiederum zu Verfälschungen bei der Berechnung der zugeführten Wärmemengen. Durch die Verzögerungen zwischen Vorlauf und Rücklauf kommt es bei steigender Vorlauftemperatur zu einem höheren Wärmeverbrauch, bei sinkender Temperatur zu einem niedrigeren Wärmeverbrauch. Gleichzeitig kann man im Diagramm ein Ansteigen der Bodentemperatur erkennen. Dieses Ansteigen zeigt, dass die zugeführte Wärmemenge nicht vollständig abgegeben wird, sondern ein Teil im Betonboden gespeichert wird. Dadurch kommt es ebenfalls zu einer Verfälschung bei der Bestimmung der  $u'$ -Werte. In Abbildung 20 ist der Verlauf der entsprechenden  $u'$ -Werte dargestellt. Bis etwa 2.00 Uhr steigen die Werte kontinuierlich an. Ab diesem Zeitpunkt fallen sie dann kontinuierlich. Im Diagramm sind zwei Kurven dargestellt. Die Kurve  $H2\ Weih\ real$  sind die Werte, die mit den tatsächlich gemessenen Wassermengen berechnet wurden. Für  $H2\ Weih\ mittel$  wurden die Wassermengen über die Nacht gemittelt.

In der zweiten Nacht wurde der Wärmeverbrauch bei geschlossenem Energieschirm gemessen. Die Mischer wurden wiederum der Regelung entsprechend am Abend fixiert. In der dritten Nacht wurde der Wärmeverbrauch ebenfalls bei geschlossenen Energieschirmen gemessen, nur dass im Haus 2 zusätzlich die Luftheizer vollständig abgeschaltet wurden. Die Ergebnisse der beiden Nächte waren

vergleichbar. Im Haus 2 lagen die Werte durch den Verzicht auf die Luftheizer etwa  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  niedriger als in der Nacht zuvor.

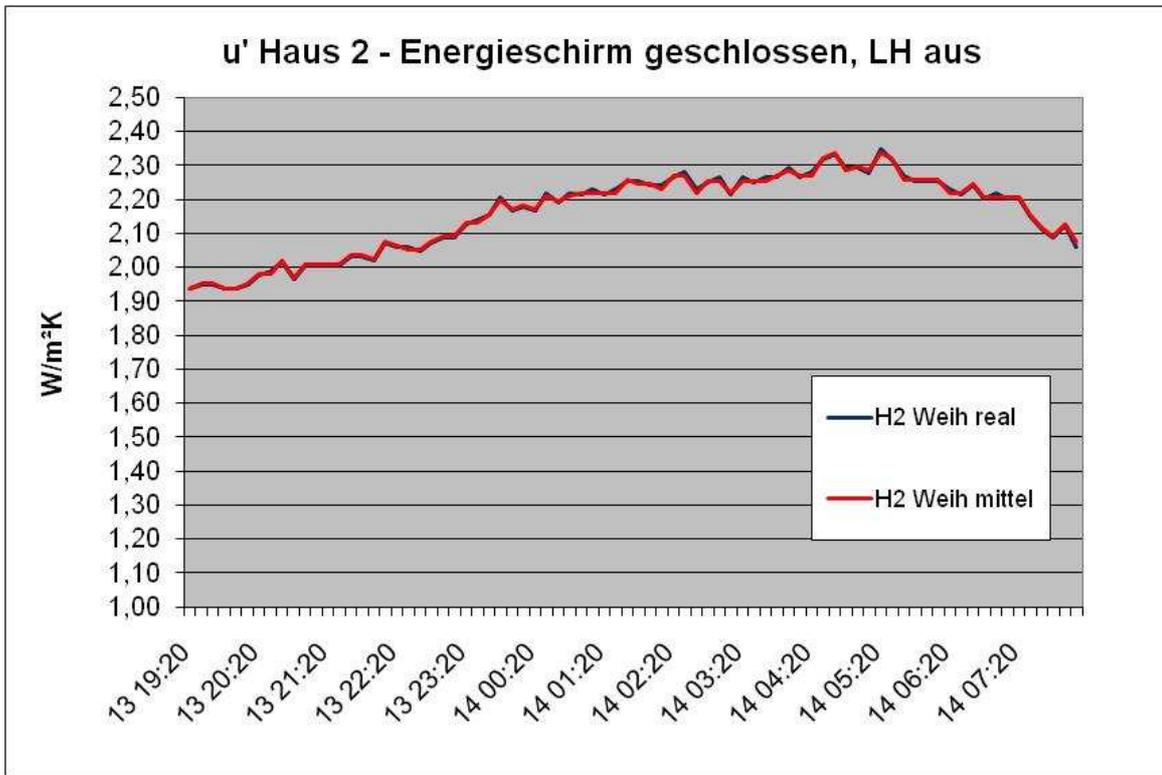


Abb. 21: Verlauf des Wärmeverbrauchscoeffizienten  $u'$  im Haus 2 bei geschlossenem Schirm, ohne LH, Januar 2010

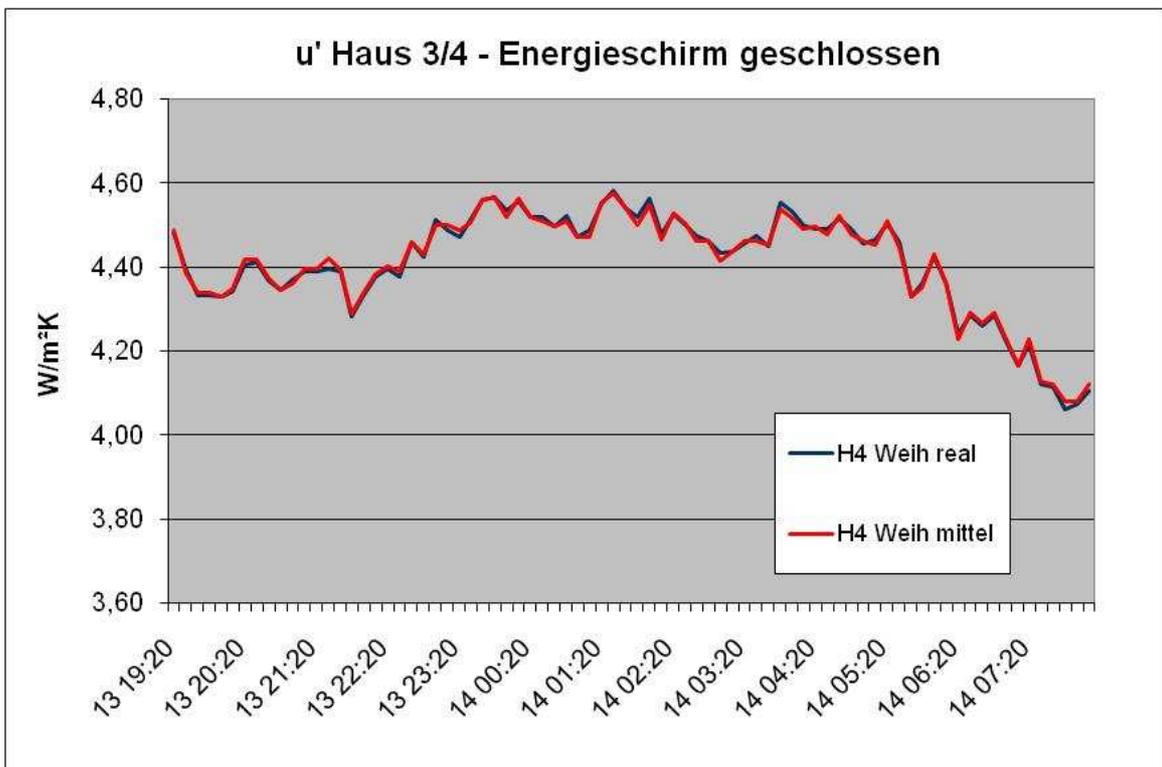
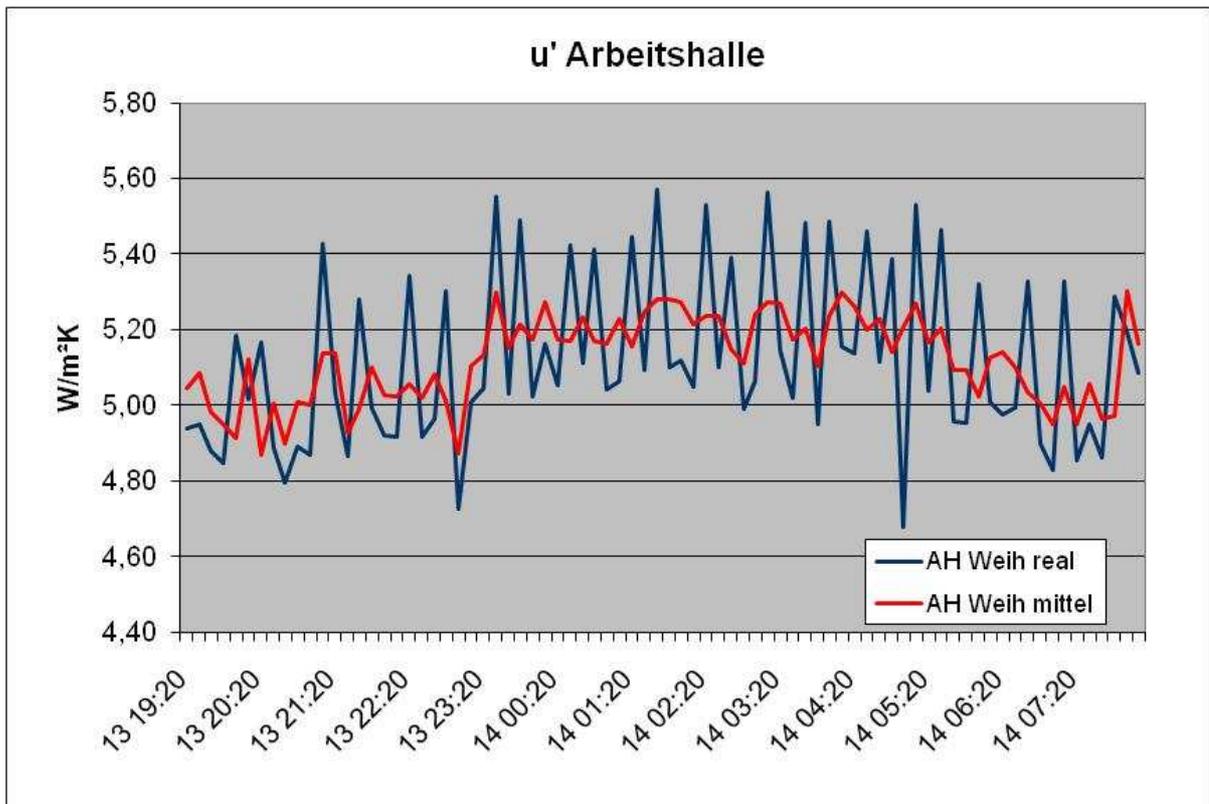


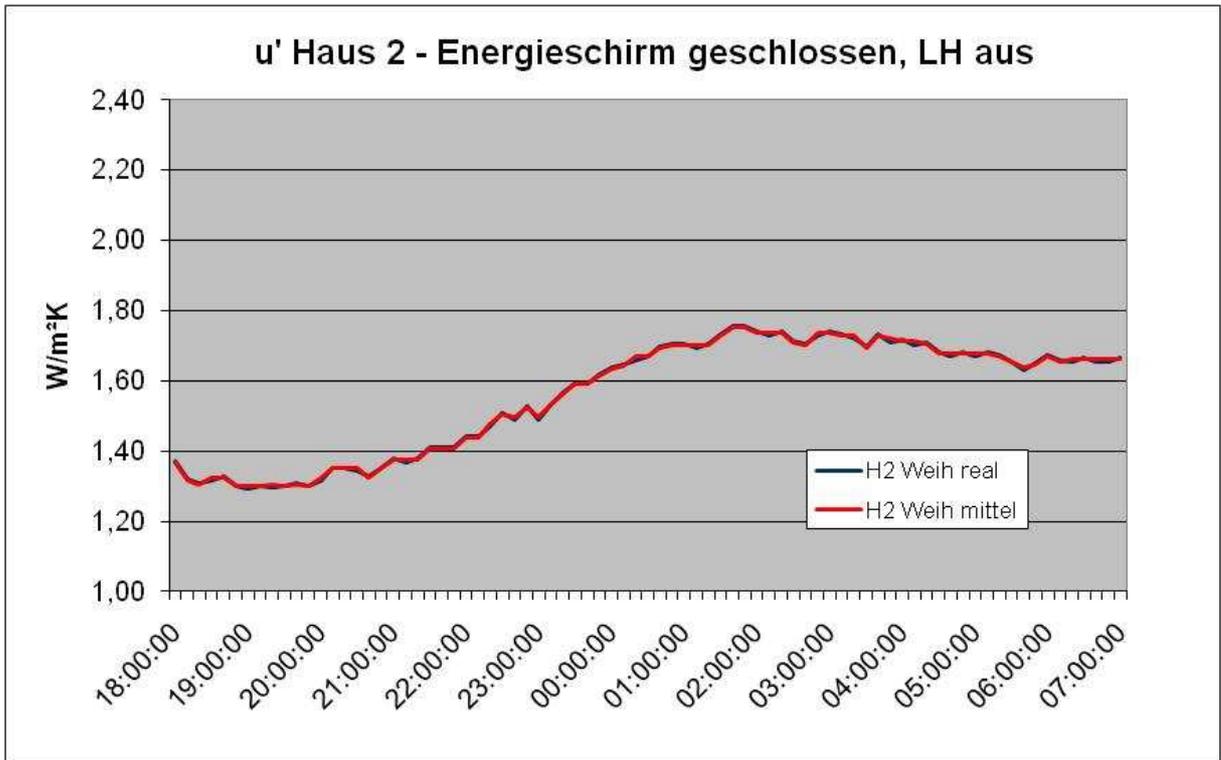
Abb. 22: Verlauf des Wärmeverbrauchscoeffizienten  $u'$  im Haus 3/4 bei geschlossenem Schirm, Januar 2010



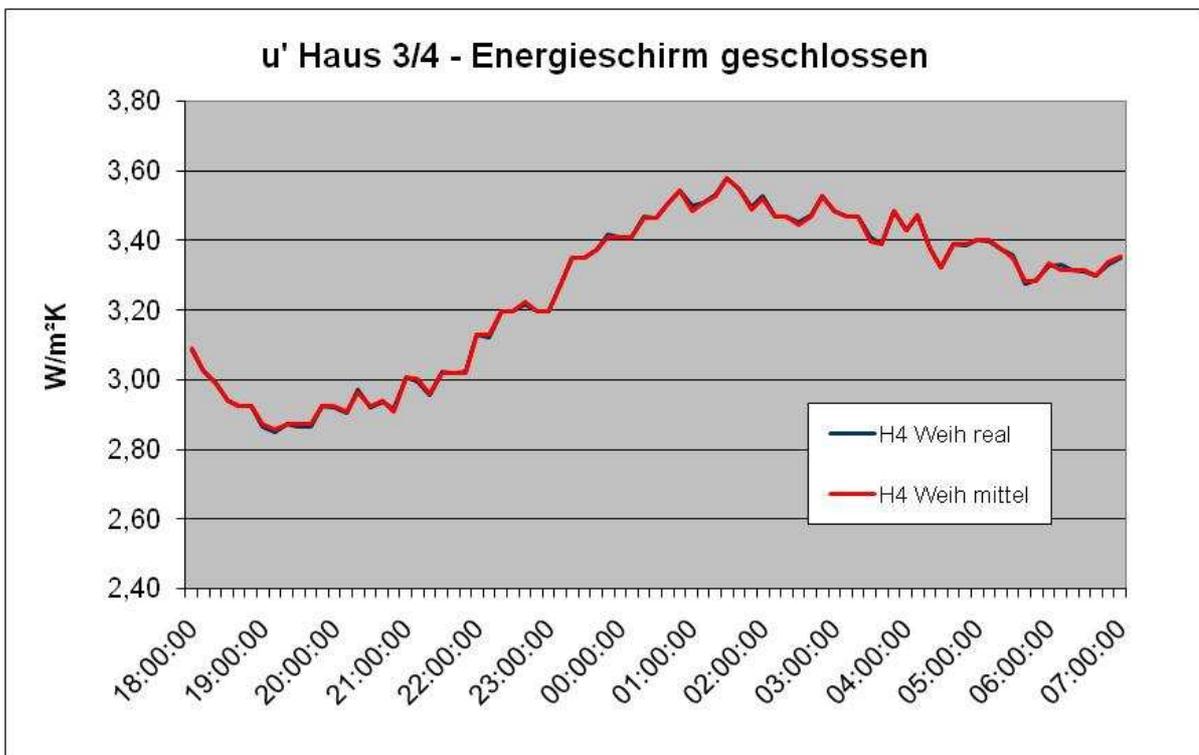
**Abb. 23: Verlauf des Wärmeverbrauchscoeffizienten  $u'$  in der Arbeitshalle, Januar 2010**

In den Abbildungen 21-23 sind die Werte der Wärmeverbrauchscoeffizienten  $u'$  für die drei Abteilungen der Gewächshausanlage dargestellt. In allen drei Graphen spiegelt sich der Verlauf der Fernwärmemetemperaturen wieder. Die Werte für die Arbeitshalle wurden aus den Differenzen des Gesamtwärmeverbrauchs und den Wärmeverbräuchen der beiden Produktionsabteile berechnet. Daher fallen hier die leichten Temperaturschwankungen der Einzelmessungen insgesamt stärker ins Gewicht.

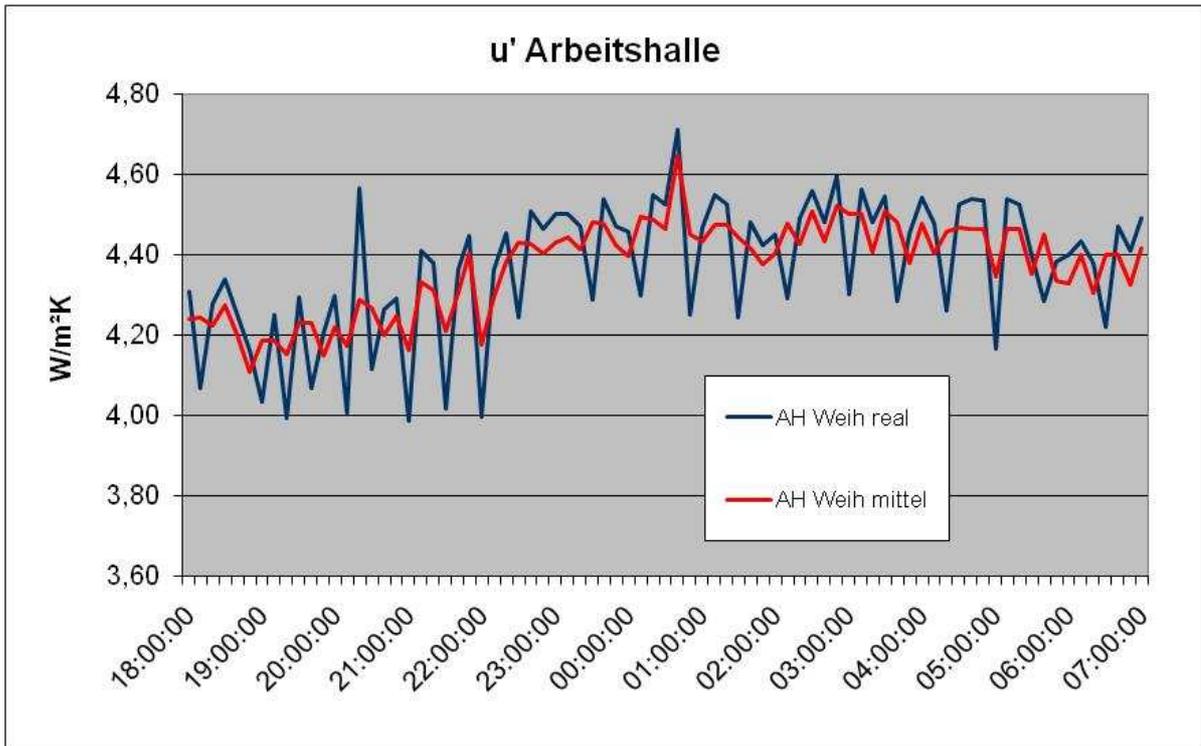
Nach vier Wochen wurden diese Messungen wiederholt. Inzwischen waren die beiden Produktionsabteile vollständig mit Pelargonien belegt. Außerdem gab es in der Zwischenzeit eine längere Kälteperiode mit Temperaturen um  $-18^{\circ}C$ . Daher war zum Zeitpunkt der Wiederholungsmessung die Fußbodenheizung auf das Maximum hochgefahren. Die mittlere Bodentemperatur lag somit bei etwa  $30^{\circ}C$ . Dadurch ergaben sich bei den Messungen deutlich bessere  $u'$ -Werte. Im Haus 2 (Abb.24) lagen die Werte zwischen 1,3 und 1,8  $W/m^2K$ , im Haus 3/4 (Abb.25) lagen die Werte zwischen 2,9 und 3,6  $W/m^2K$  und in der Arbeitshalle (Abb.26) zwischen 4,1 und 4,7  $W/m^2K$ . Aber auch in diesen Kurvenverläufen zeigt sich wieder der Verlauf der Temperaturen am Wärmetauscher. Ein Problem, das sich durch die Fixierung der Mischer ergibt, ist, dass die Erhöhung der Vorlauftemperaturen in der Fußbodenheizung nur sehr verzögert im Gewächshaus ankommt. Die Bodentemperatur steigt langsam an und füllt damit zuerst den Wärmespeicher auf. Diese Schwankungen in der Wärmemenge lassen sich nicht heraus rechnen. Für eine generelle Bestimmung der  $u'$ -Werte der einzelnen Abteile sind diese Werte zu unterschiedlich und für belastbare Werte auch zu wenige.



**Abb. 24: Verlauf des Wärmeverbrauchscoeffizienten  $u'$  im Haus 2 bei geschlossenem Schirm, ohne LH, Februar 2010**

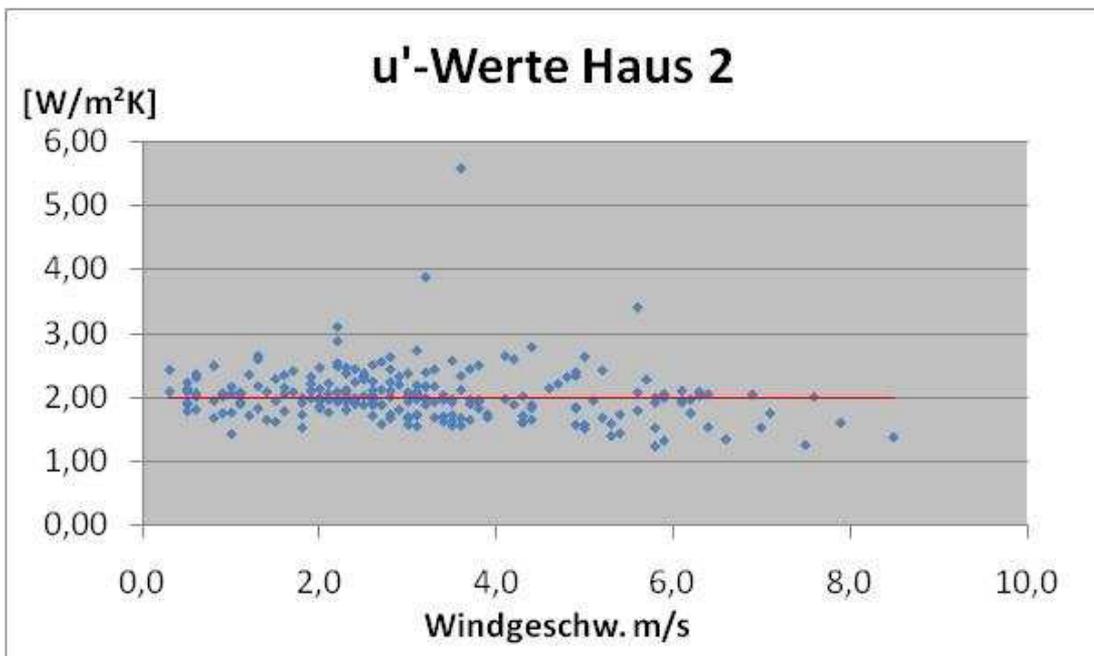


**Abb. 25: Verlauf des Wärmeverbrauchscoeffizienten  $u'$  im Haus 3/4 bei geschlossenem Schirm, Februar 2010**



**Abb. 26: Verlauf des Wärmeverbrauchscoeffizienten  $u'$  in der Arbeitshalle, Februar 2010**

In der Zeit zwischen den beiden Messungen im Januar und im Februar 2010 wurden die Daten der Durchflussmengenmesser aufgezeichnet. Die Speicherkapazität reichte für etwa drei Wochen und erfasste damit auch die bereits erwähnte Kälteperiode. Für die Nächte dieses Zeitraums wurde ebenfalls eine Auswertung der  $u'$ -Werte durchgeführt. Um den Einfluss der Windgeschwindigkeiten herauszufinden, wurden diese Werte in einem Diagramm gegen die Windgeschwindigkeit aufgetragen. Daraus ergaben sich die folgenden Diagramme.



**Abb. 27:  $u'$ -Werte im Haus 2 in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, geregelter Betrieb**

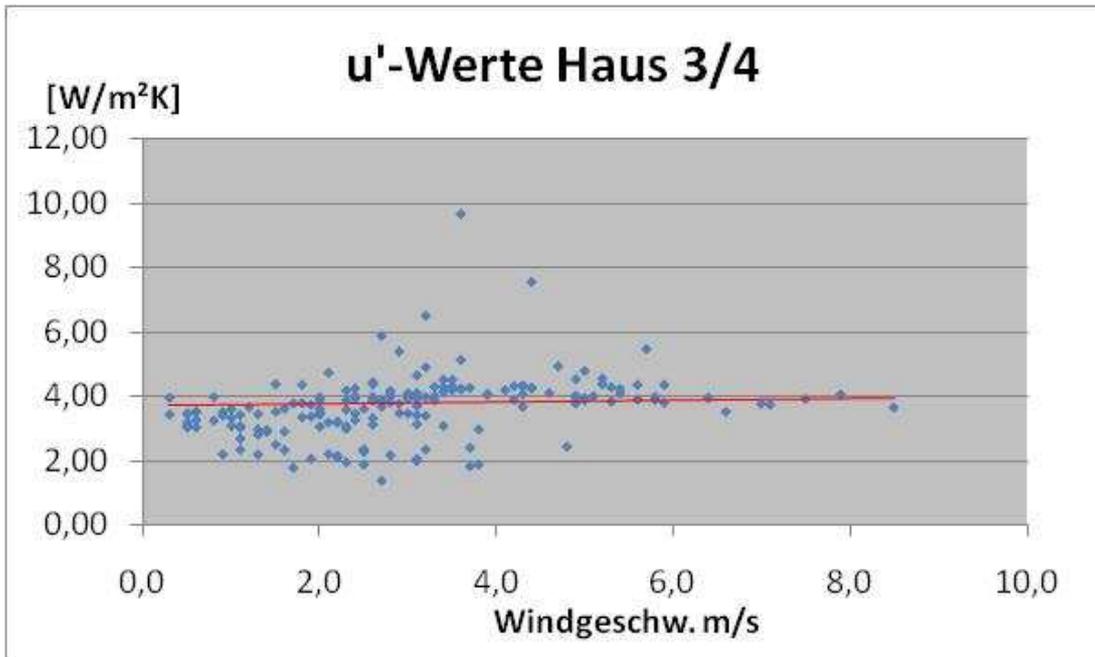


Abb. 28:  $u'$ -Werte im Haus 3/4 in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, geregelter Betrieb

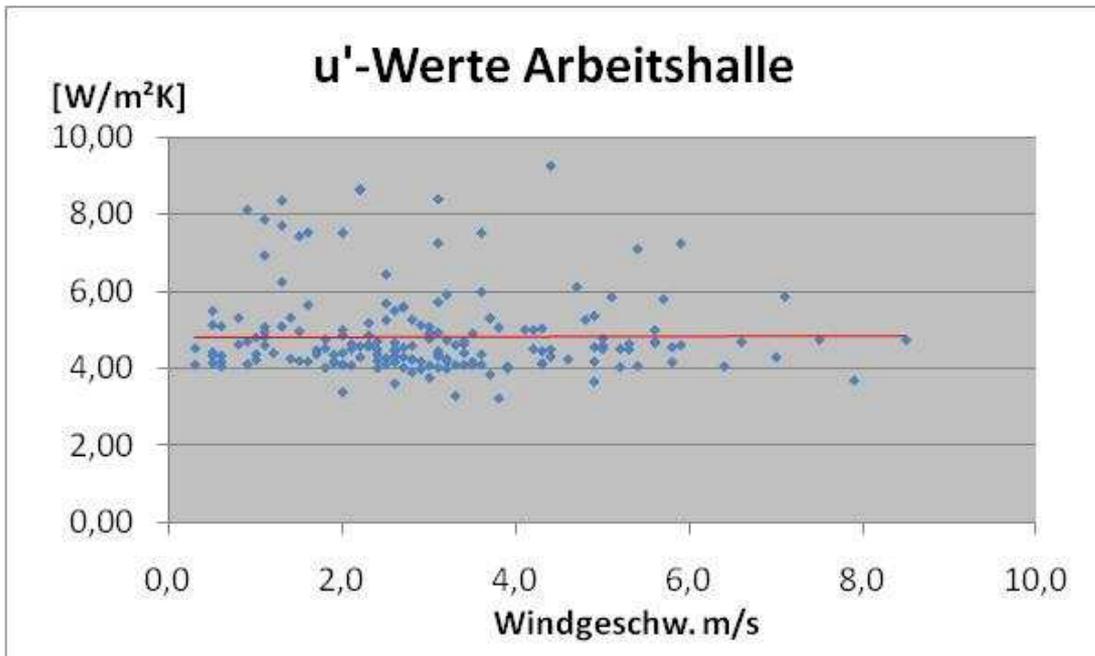


Abb. 29:  $u'$ -Werte in der Arbeitshalle in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, geregelter Betrieb

Bei den Einzelwerten handelt es sich jeweils um Stundenwerte. Da diese Werte aus dem geregelten Betrieb heraus erfasst wurden und alle erfassten Daten Mittelwerte sind, kommt es durch die Regelung zu einer gewissen Anzahl an Extremwerten. Außerdem konnte in diesem Zeitraum nicht erfasst werden, welche Arbeiten in den einzelnen Abteilen durchgeführt wurden. Daher wurden die Extremwerte für die weitere Betrachtung ausgeschlossen. Für alle drei Abteile kann keine

Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit festgestellt werden. Für die weiteren Auswertungen wurden daher konstante Werte für die drei Isolierungsstufen festgelegt. Für die Doppelfolie (Arbeitshalle) wird ein mittlerer Wert von  $4,8 \text{ W/m}^2\text{K}$  verwendet. Für den einfachen Energieschirm (Haus 3/4) wird ein Wert von  $3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  verwendet und für die Kombination von einfachem Energieschirm und der Verdunkelung (Haus 2) ein Wert von  $2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Im Haus 2 sollte der Wert eigentlich noch etwas besser sein, da hier die Verdunkelung an der Giebelseite des Hauses noch nicht an die Regelung angeschlossen ist und daher die meiste Zeit offen steht. Wird diese Seite ebenfalls geschlossen, sollte zumindest noch eine leichte Verbesserung in der Isolierwirkung erzielt werden.

### 4.3 Lichtangebot im Gewächshaus

Die Anteile der Globalstrahlung, die ins Gewächshaus gelangen sind im Wesentlichen von folgenden Faktoren bestimmt:

- Art und Qualität des Bedachungsmaterials
- Einstrahlungswinkel und Aufstellungsrichtung
- Bewölkung bzw. Tages- und Jahreszeit
- Kondensationsverhalten der Bedachung
- Verschmutzungsgrad der Anlage

Durch die moderne Bauweise wird den Pflanzen ein hohes Lichtangebot zur Verfügung gestellt. Um exakte Daten für die Lichtdurchlässigkeit zu erhalten wird mit dem Strahlungsintegrator (Abb. 13) die im Gewächshaus ankommende Strahlung bestimmt. Um vernünftige Werte zu bekommen wird erst ab einem ausreichenden Lichtangebot gemessen, das im Herbst bzw. Winter nicht vor 10.00 Uhr erreicht ist. Durch die hohe Stehwand, die Aufstellung in Nord-Südrichtung, sowie durch die unterschiedliche Inneneinrichtung ist eine unterschiedliche Lichtdurchlässigkeit zu erwarten. Die erste Messung wurde im Dezember 2007 im Haus 2 vorgenommen. Die Graphik (Abb. 17) zeigt die gemessene innere und äußere Globalstrahlung. Durch den relativ geradlinigen Verlauf der Außenstrahlung und dass die lokalen Spitzen bei ca.  $35 \text{ W/m}^2$  lagen, herrschte eine starke, gleichmäßige Bewölkung. Die aus dem Strahlungsintegrator erhaltenen Messdaten für Innen folgen exakt dem Kurvenverlauf der Außenstrahlung auf einem niedrigeren Niveau. Die daraus resultierende Durchlässigkeit ist ebenfalls in der Graphik mit dargestellt. Hier ergibt sich eine annähernd gleichmäßige Kurve. Die durchschnittliche Lichtdurchlässigkeit liegt bei 55 %. Die zweite Messung (Abb. 18) zeigt deutlich höhere Werte, was sich auch am leicht glockenartigen Verlauf der Kurve wieder spiegelt. Auch diesmal folgt die gemessene Innenstrahlung zielgenau der Außenstrahlung auf einen noch etwas niedrigeren Level. Das errechnete Mittel ergibt einen Wert von 52 %. Die leicht geringere Lichtausbeute kann durch die zusätzlich eingebauten Natrium-Hochdruckdampflampen verursacht worden sein. Für das Haus 2 wird auch im Oktober 2008 (Abb. 19) nochmals gemessen.

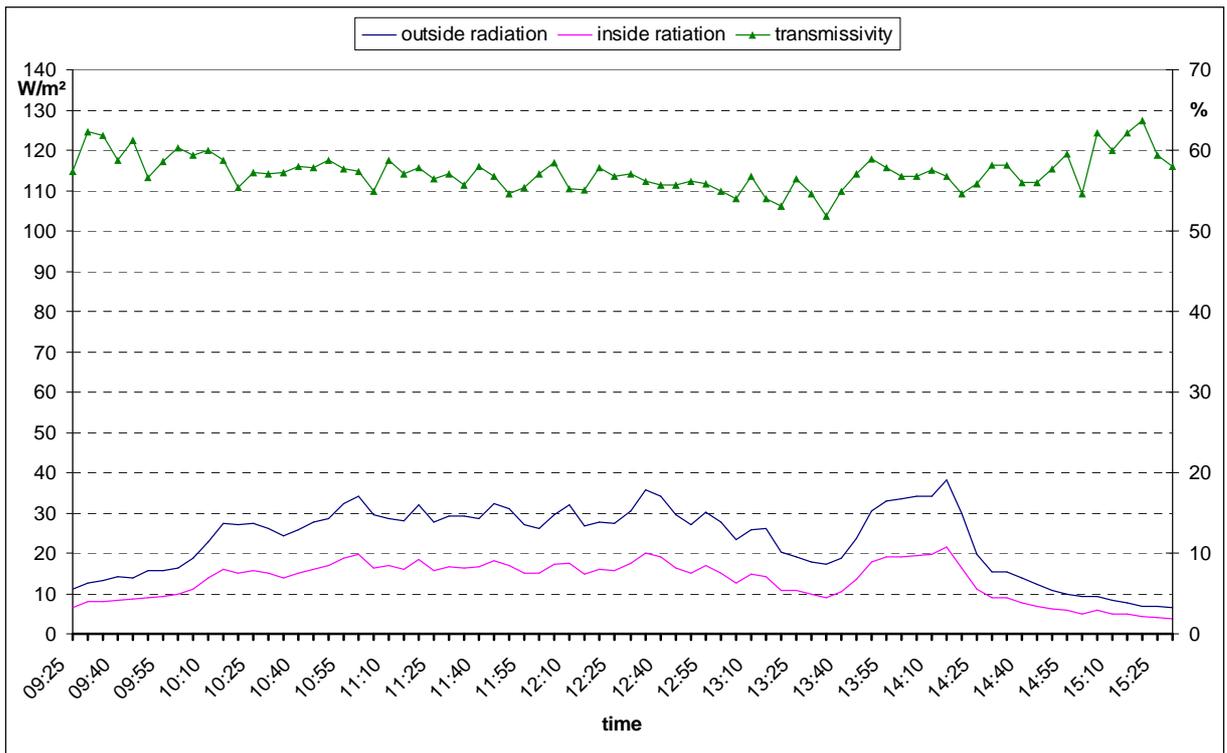


Abb. 30: Messung der Lichteinstrahlung und Durchlässigkeit am 12.12.2007 im Haus 2

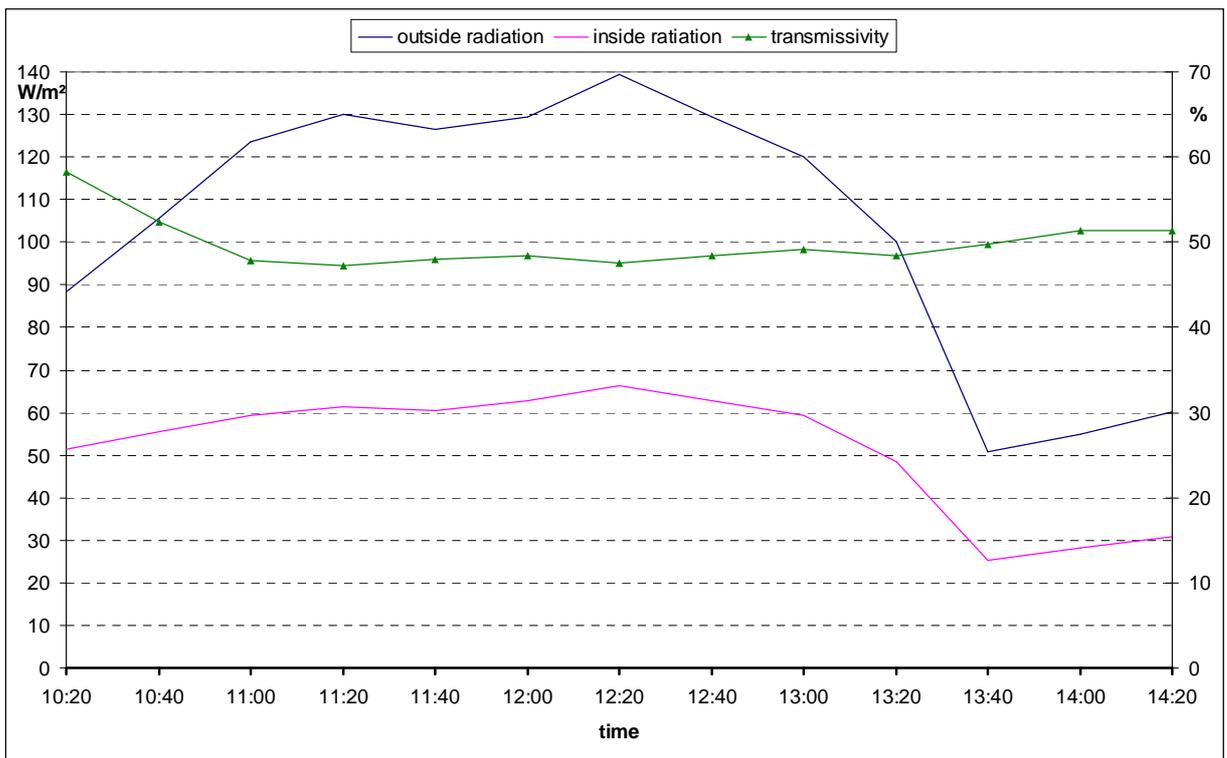
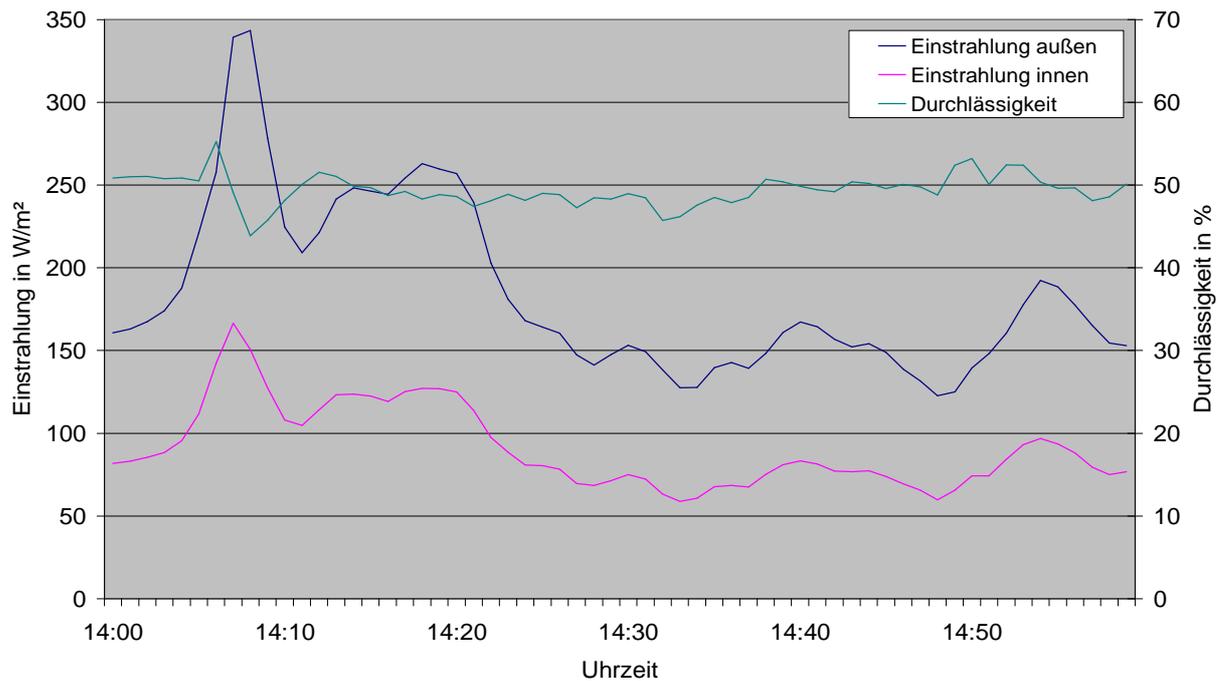
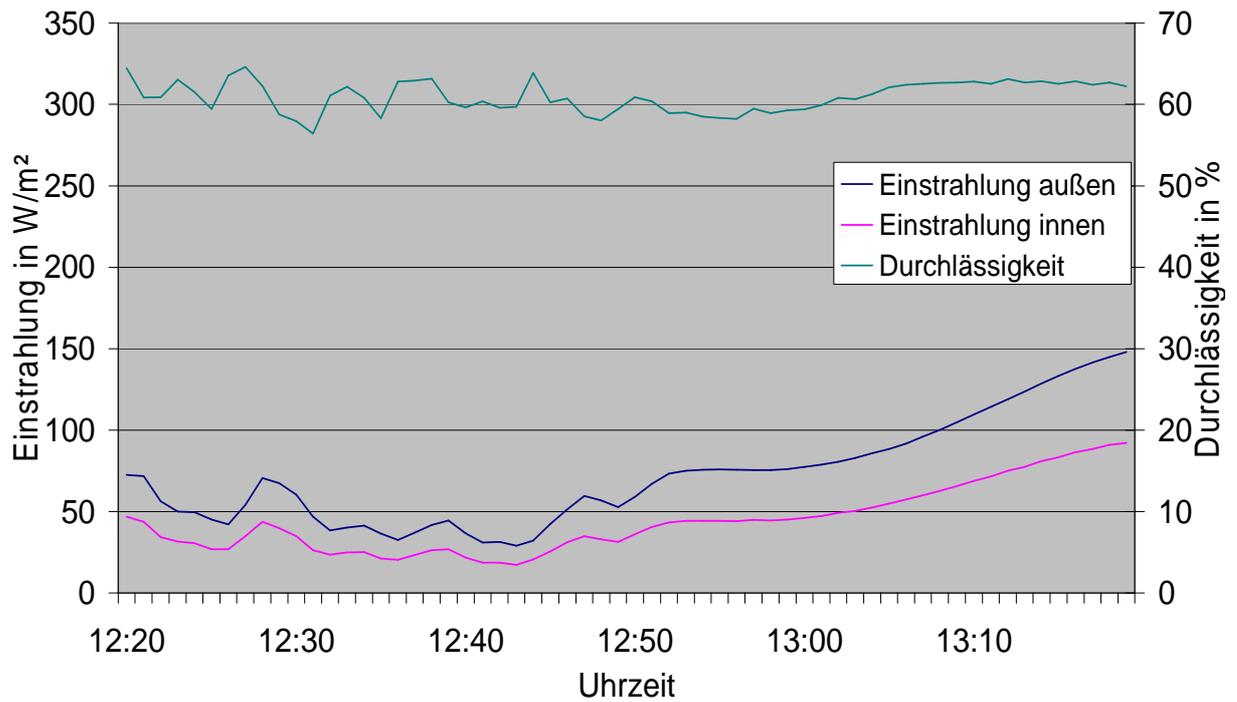


Abb. 31: Messung der Lichteinstrahlung und Durchlässigkeit am 29.01.2008 im Haus 2

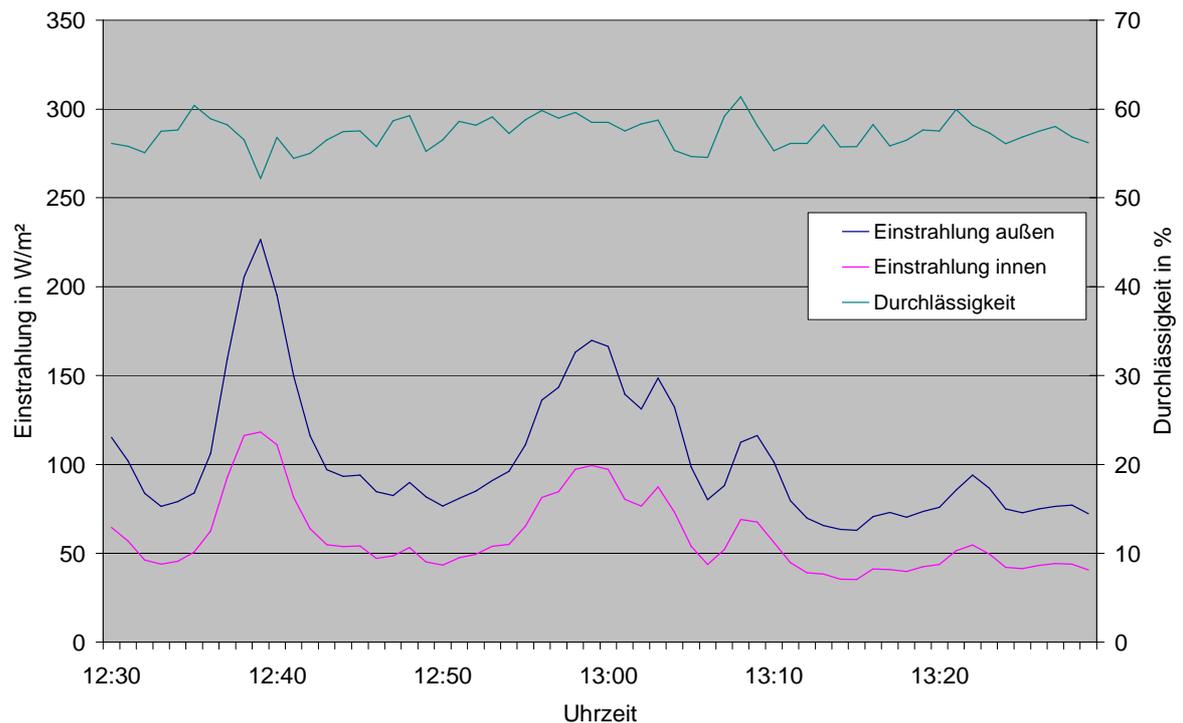


**Abb. 32: Messung der Lichteinstrahlung und Durchlässigkeit am 02.10.2008 im Haus 2**

Im Oktober 2008 wurden speziell die einzelnen Häuser miteinander verglichen. Im Haus 3 wird die höchste Lichtdurchlässigkeit mit durchschnittlich 60 % und 57 % erreicht, sowohl bei niedriger Einstrahlung (Abb. 20) als auch bei höherem Lichtangebot (Abb. 21). Wie bereits eingangs erwähnt ergibt sich dieser positive Effekt durch die hohe Stehwand und durch den von Süden angestrahlten Giebel von Haus 3 (Abb. 16). Selbst bei diffusen Lichtverhältnissen ist die Verfügbarkeit des Lichtes im Haus 3 an der gemessenen Stelle noch deutlich höher als im Haus 4! Der Durchschnittswert für Haus 4 bei noch höherer Globalstrahlung als bei Haus 3 gemessen ist bei 51 %, was aber immer noch eine sehr gute Lichtausbeute für ein Gewächshaus mit Doppelfolie zu dieser Jahreszeit ist. Bei allen Lichtdurchlässigkeitsmessungen ergeben sich sehr konstante Werte, was bei einer punktuellen Messung nicht möglich gewesen wäre.



**Abb. 33: Messung der Lichteinstrahlung und Durchlässigkeit am 02.10.2008 im Haus 3 bei niedriger Einstrahlung**



**Abb. 34: Messung der Lichteinstrahlung und Durchlässigkeit am 02.10.2008 im Haus 3 bei hoher Einstrahlung**

## 4. 4 Klima im Sommer

### 4. 4.1 Temperaturverläufe

#### 4. 4.1.1 Die Lufttemperatur

Im Sommer wird die Wärmebilanz am stärksten durch die Einstrahlung der Sonne (Energiezufuhr) und den Luftaustausch (Energieabtransport) beeinflusst. Deshalb werden für die Veranschaulichung der Sommerklimatisierung jeweils Tage mit hoher und niedriger Einstrahlung ausgewählt. Die Abb. 22 zeigt einen relativ klaren Sommertag im August mit einer maximalen Einstrahlung von  $825 \text{ W/m}^2$  um 12.40 Uhr. Durch die hohen Strahlungswerte an diesem Tag zeigt sich für die Globalstrahlung eine typische Glockenkurve. Dem Anstieg der Einstrahlung zu Tagesbeginn folgen auch die Temperaturen. Die lokalen Maximalwerte der Temperaturen befinden sich im Zeitraum von 16.40 bis 17.00 Uhr, welche dem Einstrahlungsmaximum durch den Speichereffekt des Hauses nachgelagert sind. Das lokale Minimum der Außentemperatur befindet sich zwischen 5.00 und 6.00 Uhr. Die Lufttemperatur im Dach und am Pflanzenbestand sinkt mit dem Rückgang der Strahlung stark ab. Ab 22.00 Uhr ist die Strahlung gleich null, die Temperaturen weisen eine Zeitverzögerung von 2 Stunden auf, bis auch sie ihr Minimum erreichen. Die größte Amplitude weist natürlich die Außentemperatur auf, da es in der Frühe teilweise auch im Sommer bis kurz unter  $10^\circ\text{C}$  geht.

Durch den fast identischen Temperaturverlauf der Außen- mit den Innentemperaturen auch bei sehr hoher Einstrahlung, lässt sich ein sehr gutes Lüftungsverhalten bescheinigen. Durch diese gute Klimatisierung sind keine Übertemperaturen zu erwarten.

Auch beim Tag mit niedriger Einstrahlung (Abb. 23) sind die Temperaturabläufe stark von der Einstrahlung abhängig. Mit zunehmender Strahlung steigt auch die Lufttemperatur. Das Maximum der Lufttemperatur ist wiederum leicht zeitlich verzögert zur Einstrahlung. Danach erfolgt ein Ablüften, durch die guten Lüftungseigenschaften kommt es zu einem sehr raschen Absinken der Temperatur.

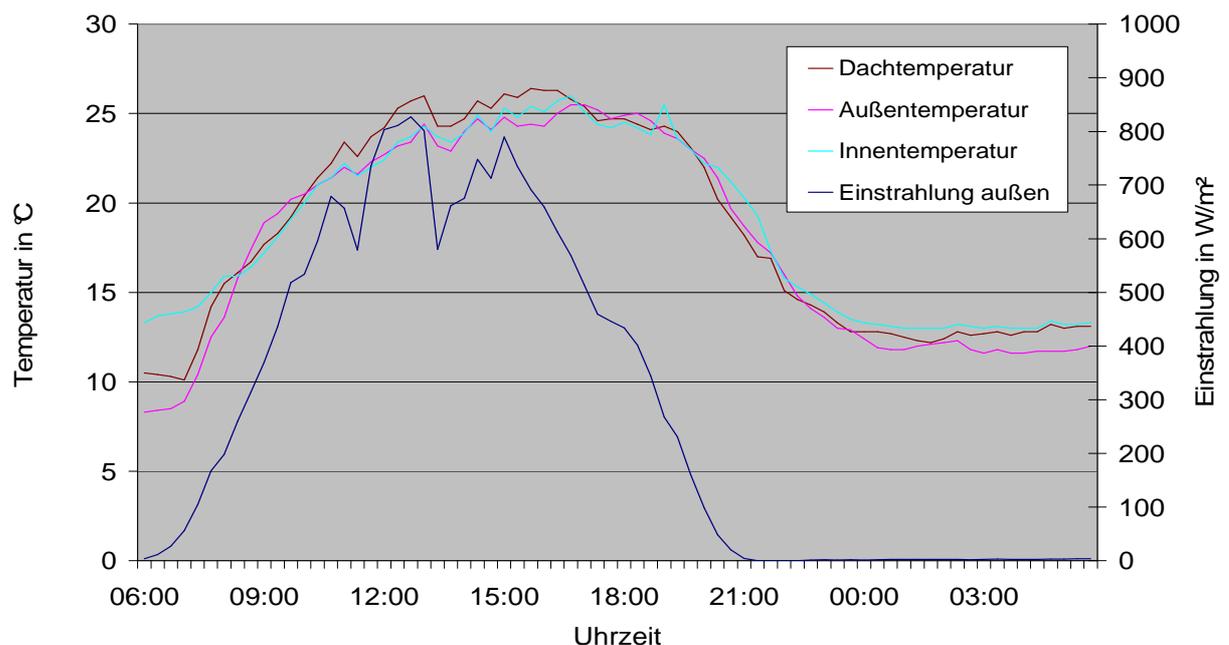
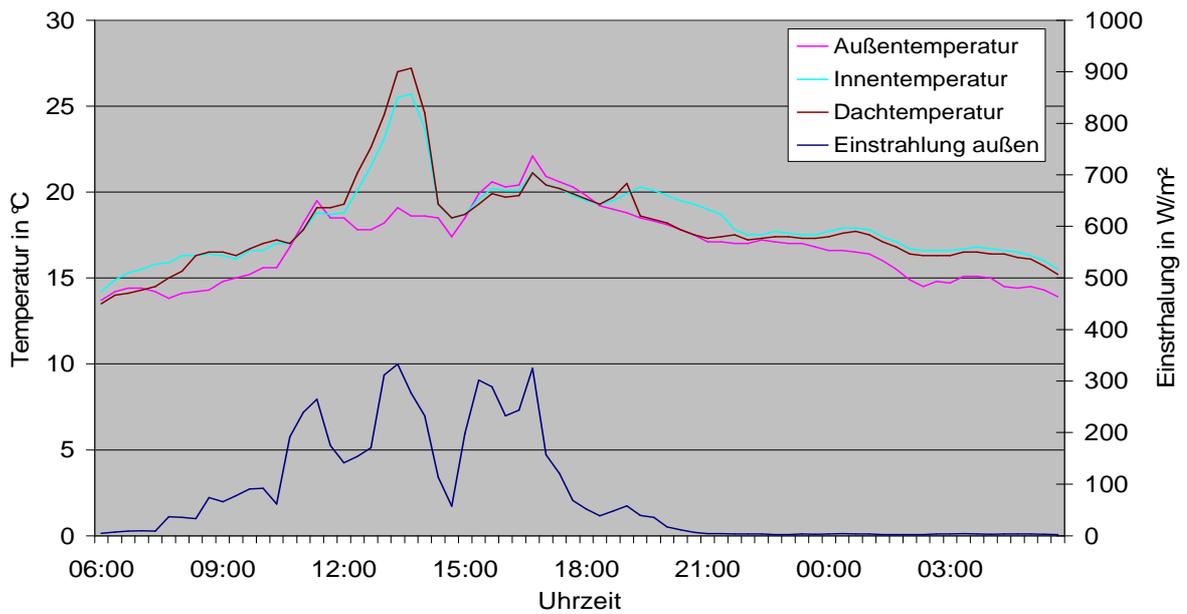


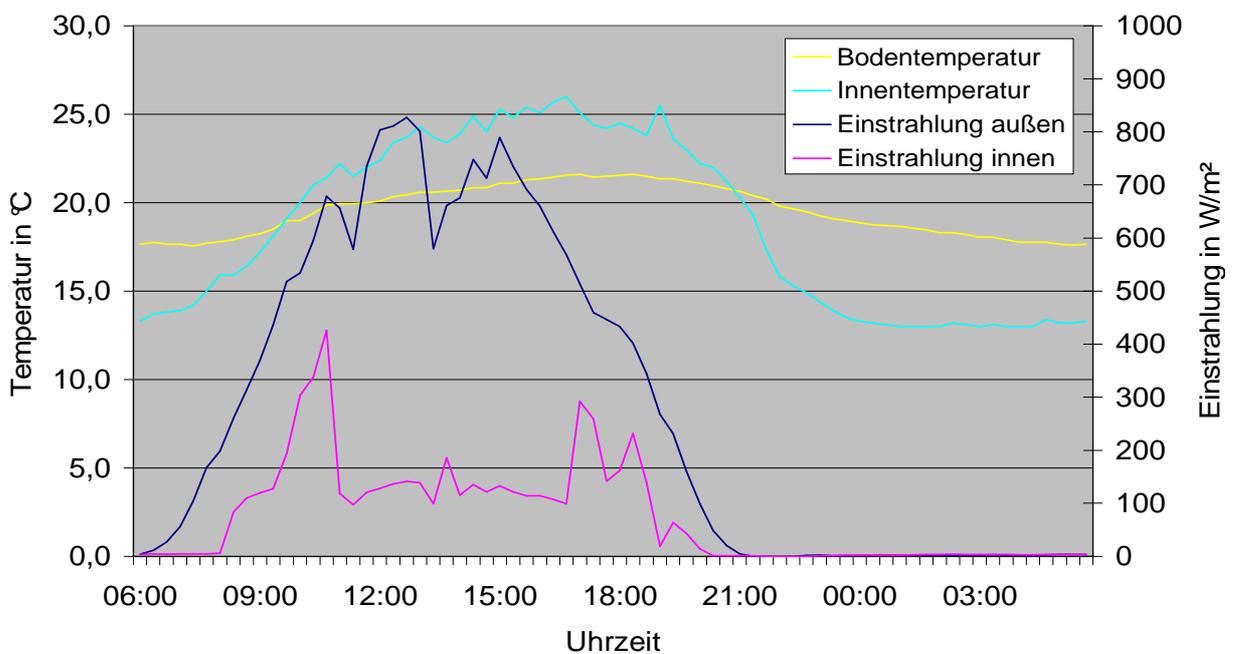
Abb. 35: Temperaturverläufe im Gewächshaus – Sommersituation bei hoher Einstrahlung



**Abb. 36: Temperaturverläufe im Gewächshaus – Sommersituation bei niedriger Einstrahlung**

#### 4. 4.1.2 Die Bodentemperatur

Auch im Sommer wird die Bodentemperatur durch die Einstrahlung mit bestimmt. Bei Tagen mit hoher Einstrahlung (Abb. 24) ist der Anstieg deutlich größer. Im Vergleich zur Luft ist der Boden viel träger, die Amplitude ist deutlich kleiner. Außerdem wird dieser Effekt durch die höhere Wärmespeicherkapazität des Bodens unterstützt. Die Lufttemperatur fällt unter die Bodentemperatur, an der Stelle wo die Einstrahlung gegen null geht. Umgekehrt dauert es etwas länger bis ein Grundniveau an Strahlung gewährleistet ist und die Lufttemperatur die Bodentemperatur wieder übersteigt.



**Abb. 37: Vergleich Einstrahlung und Bodentemperatur im Haus 2**

#### 4.4.2 Feuchte

Die Werte der Luftfeuchtigkeit werden ebenfalls durch die Strahlung beeinflusst (Abb. 38) Die Feuchte verhält sich antizyklisch im Vergleich zur Temperatur mit Zunahme der Einstrahlung sinkt die relative Luftfeuchte hier bis auf 45 % ab. Strebt die Globalstrahlung gegen null steigt die Feuchte wieder relativ schnell an. Letztendlich werden sogar Werte von über 90 % erreicht, da die abgekühlte Luft nicht mehr in der Lage ist so viel Wasserdampf aufzunehmen. Die kurzfristigen Anstiege der Luftfeuchte während des Tages sind überwiegend auf die Bewässerungseinheiten zurückzuführen. Bei Tagen mit geringer Einstrahlung und teilweise sogar Regen ergeben sich natürlich noch andere Kurvenverläufe, die Amplitude fällt deutlich kleiner aus. Da keine Niederschlagsmessung durchgeführt wurde, kann der direkte Zusammenhang der Luftfeuchte mit Regen nicht genauer betrachtet werden. Die Luftfeuchte im Haus ist außerdem stark von der Transpiration des Pflanzenbestandes abhängig.

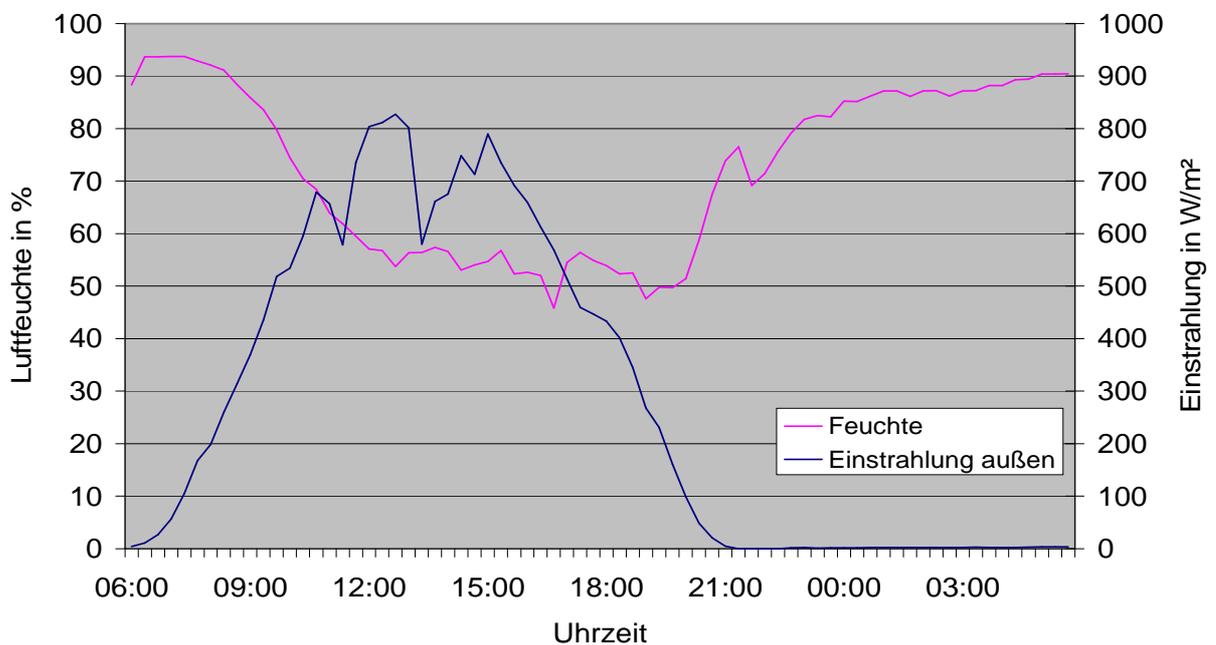


Abb. 38: Vergleich Einstrahlung und Relative Luftfeuchte im Haus 2

## 4. 5 Temperaturen im Winter

Die Wintersituation ist geprägt von niedrigen Außentemperaturen und Einstrahlungswerten. Die Temperaturen lagen in den beiden Messperioden im Winter in der Regel zwischen 0 und 5°C. Für die Diagramme wurde exemplarisch die kälteste Woche vom 26.02.2009 bis 01.03.2009 ausgewählt. Hier lagen die Außentemperaturen durchgehend unter 0°C. In dieser Zeit waren die Produktionsflächen mit Pelargonien belegt und die Innentemperatur wurde tagsüber auf 18°C und auf 16°C in der Nacht geregelt. Als zusätzliche Messpunkte wurde in beiden Produktionsabteilungen die Dachtemperatur über dem Energieschirm erfasst. Bei offenem Schirm ist der Verlauf der Dachtemperatur identisch mit dem der Innentemperatur. Wenn der Schirm abends geschlossen wird sinkt die Dachtemperatur sehr schnell deutlich ab. Im Haus 3 mit einem einfachen Energieschirm liegt die Dachtemperatur in diesem Zeitraum bei etwa 11°C. Im Haus 2, in dem zusätzlich zum Energieschirm eine Verdunklung installiert ist, sinkt die Dachtemperatur auf etwa 6-8°C ab. Diese Temperaturverläufe zeigen deutlich den hohen Energieeinspareffekt der Schirme und auch die gute Verarbeitung bei der Installation.

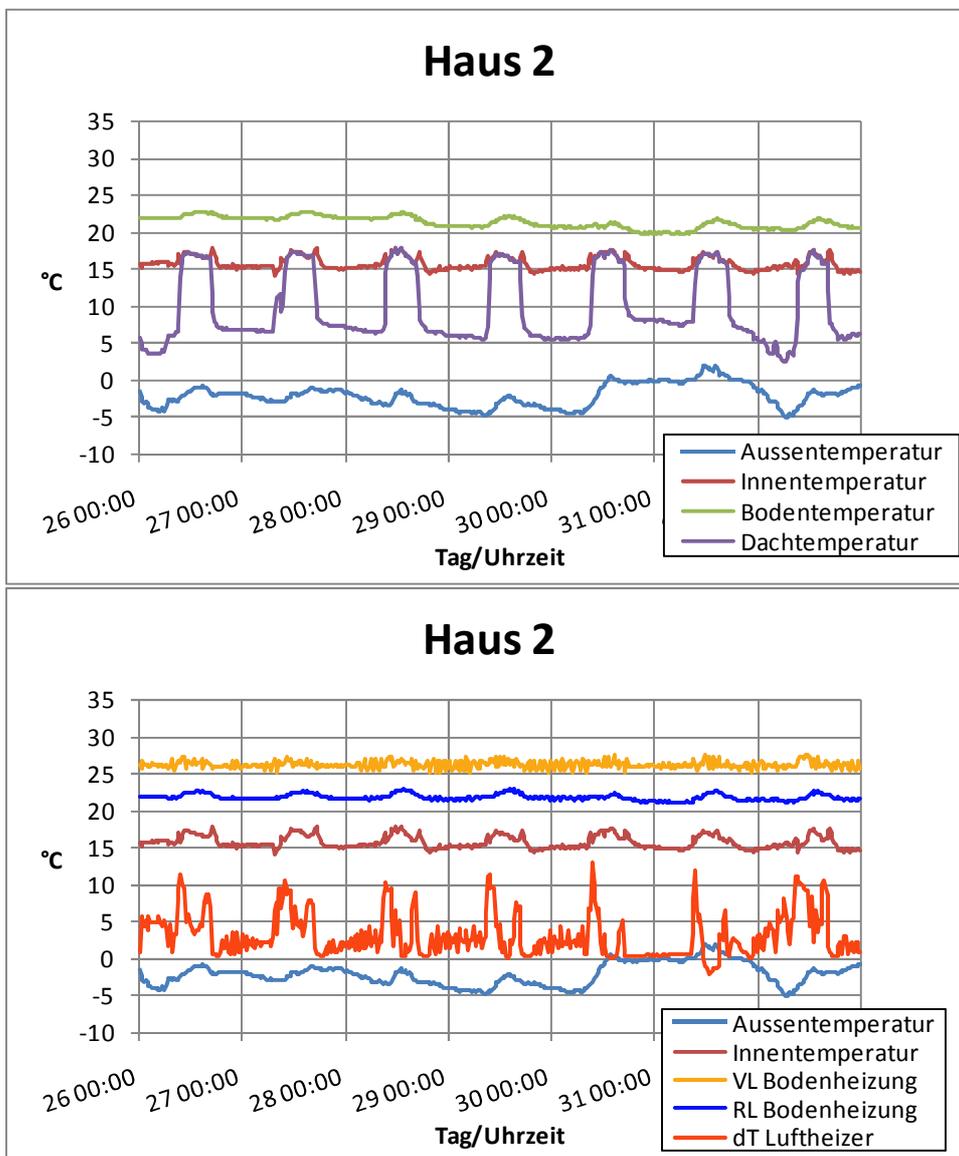


Abb. 39: Vergleich verschiedener Temperaturverläufe vom 26.11. – 01.12.2008 in Haus 2

Die Qualität der Energieschirme hat einen direkten Einfluss auf das Heizungssystem. Über die Fußbodenheizung wird die Grundversorgung der einzelnen Abteile gedeckt. Die Lastspitzen und Temperaturschwankungen werden durch die Luftheizer ausgeglichen. Die Vorlauftemperaturen für die Fußbodenheizungen werden jeweils konstant gehalten, um Spannungsprobleme innerhalb des Betonbodens zu vermeiden. In den Diagrammen ist für beide Produktionsabteile die gemessene Bodentemperatur dargestellt. Sie ist jeweils identisch mit der Temperaturkurve der Rücklaufleitung der Fußbodenheizung. Vergleicht man die Häuser 2 und 3, so liegt die Bodentemperatur im Haus 2 um etwa 5°C niedriger als im Haus 3. Durch den Einsatz der beiden Energieschirme kann somit die Grundlast von Haus 2 deutlich abgesenkt werden. Tagsüber steigt die Bodentemperatur jeweils leicht an. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Innentemperatur am Tag erhöht wird und dadurch die Wärmeabgabe des Bodens reduziert. Die Temperatur des Bodens steigt an, bis wieder ein Gleichgewicht zwischen Wärmezufuhr und Wärmeabgabe erreicht ist.

Die Laufzeiten der Luftheizer können nur sehr schlecht erfasst werden, da sie nicht kontinuierlich auf einem angepassten niedrigen Temperaturniveau, sondern für kurze Intervalle bei hoher Temperatur laufen. Da für die einzelnen Heizkreise keine Heizwassermengen erfasst werden können, können die Laufzeiten der Luftheizer nur durch die Temperaturdifferenzen ( $dT$ ) zwischen Vor- und Rücklauf ungefähr abgeschätzt werden. Allerdings stellen die einzelnen Messwerte nur Mittelwerte über einen Zeitraum von 20 Minuten dar. Die Laufzeitintervalle der Luftheizer sind aber in den meisten Fällen deutlich kürzer und nicht an die Speicherzeiten angepasst. Auch die Umwälzpumpen laufen nur nach Bedarf. Das bedeutet, dass im Bedarfsfall Heißwasser zu den Luftheizern gepumpt wird, dort ein Teil der Wärme abgegeben wird, und dann mit einer zeitlichen Verzögerung von einigen Minuten am Rücklauf die verbleibende Wärmemenge über die Temperatur erfasst werden kann. Schalten Luftheizer und Umwälzpumpe ab, verbleibt das heiße Wasser in den Rohren – mit der momentanen Temperaturdifferenz von Vor- und Rücklauf – und kühlt dort langsam ab. In der Darstellung aus Haus 2 kann man in den Morgenstunden bei Öffnen des Energieschirms jeweils einen deutlichen Anstieg der Temperaturdifferenz erkennen. Dieser ist aber auf zwei Gründe zurückzuführen:

Zum Einen natürlich auf die erhöhte Wärmeabgabe durch das Anheben der Innentemperatur und das notwendige Aufheizen des Dachraumes, zum anderen auf die zeitliche Verzögerung zwischen der Erfassung der Vorlauftemperatur und der Rücklauftemperatur. Die Auswirkungen der zeitlichen Verzögerung werden aber durch die Bildung der Mittelwerte etwas abgeschwächt.

In der Darstellung aus Haus 3 fallen diese sprunghaften Anstiege wesentlich schwächer aus. Hier sind zwar die Rohrleitungen deutlich länger und damit auch der Verzug in der Messung, aber durch die schlechtere Isolierung mit nur einem Energieschirm müssen die Luftheizer auch in den Nachtstunden öfter zuheizen und die Rohre können nicht so stark abkühlen als in Haus 2. Außerdem kühlt in Haus 3 durch den einfachen Energieschirm der Dachraum nicht so stark ab und muss daher auch nach dem Öffnen des Schirms nicht so weit aufgeheizt werden.

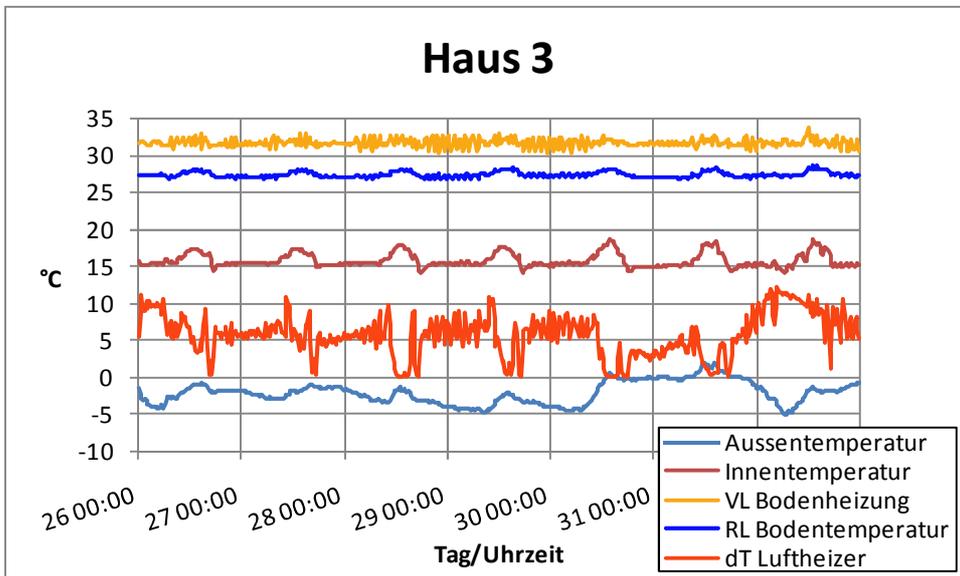
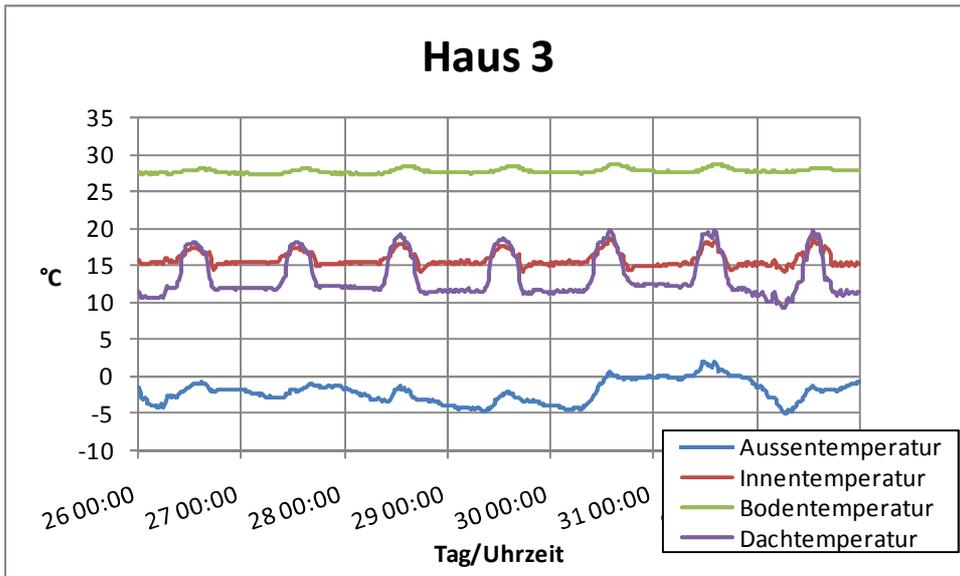


Abb. 40: Vergleich verschiedener Temperaturverläufe vom 26.11. – 01.12.2009 in Haus 3

## 4.6 Wärmebereitstellung und Verluste

Die Wärmebereitstellung erfolgt durch die Erdwärme Neustadt-Glewe GmbH. Über eine Wärmetrasse von ca. 500m Länge wird die Wärme aus dem Rücklauf der Hauptfernwärmeleitung zur Gärtnerei Baumgärtner transportiert. Die Leitung ist derzeit auf eine Leistung von ca. 2,1 MW ausgelegt. Die Wärme kommt in der Gärtnerei mit einer Temperatur von ca. 60 °C an und wird über einen Wärmetauscher in das Heizsystem der Gärtnerei gebracht. Geregelt wird die Wärmetrasse über Drucksensoren. Wird von der Gärtnerei Wärme abgenommen, sinkt der Druck in der Leitung und es wird mehr Heißwasser zur Verfügung gestellt. Da die Wärmeversorgung nicht mit der Gewächshausregelung verbunden ist, kann die Wärmebereitstellung nicht genau auf den Bedarf abgestimmt werden. Dadurch kommt es bei geringen Abnahmemengen durch die Gärtnerei zu hohen Leitungsverlusten. Bei einer durchschnittlichen Wärmeabnahme liegen die Verluste etwa bei 8%. Dieser Wert entspricht auch den Werten, die in der Literatur für Leitungsverluste angegeben werden. Bei sehr niedrigen Abnahmemengen steigen die Wärmeverluste auf bis zu 60%, die vom Gärtner getragen werden müssen. Daher sollten sehr niedrige Verbräuche nach Möglichkeit vermieden werden.

## 5. Simulation

Die Wärmeverbräuche für verschiedene Regelstrategien werden in einer Simulation berechnet, da so die Entwicklung über längere Zeiträume dargestellt werden können, die im Rahmen eines Versuchs in diesem Ausmaß zu teuer und mit zu viel Aufwand verbunden wären.

### 5.1 Grundlagen

Die Simulation der Wärmeverbräuche der Gewächshausanlage erfolgt nach folgender Formel:

$$q = u' * \frac{AH}{AG} * (ti - ta) - qs * \eta * \tau$$

q:	Wärmeverbrauch
u':	Wärmeverbrauchscoeffizient
A <sub>H</sub> :	Hüllfläche des Gewächshauses, bzw. des Abteils
A <sub>G</sub> :	Grundfläche
T <sub>i</sub> :	Innentemperatur
T <sub>a</sub> :	Außentemperatur
q <sub>s</sub> :	Globalstrahlung in W/m <sup>2</sup>
η:	Umwandlungsfaktor für Strahlung in Wärme
τ:	Strahlungsdurchlässigkeit der Gewächshausanlage

Die Werte für u' wurden bereits im Kapitel 4.2 dargestellt. Für die drei Isolierungsstufen werden die Werte 4,8 W/m<sup>2</sup>K für Doppelfolie, 3,7 W/m<sup>2</sup>K für den einfachen Energieschirm und 2,0 W/m<sup>2</sup>K für den Energieschirm und die Verdunkelung verwendet. Für A<sub>H</sub> und A<sub>G</sub> werden die entsprechenden Abmessungen des vorhandenen Gewächshauses, unterteilt in die drei Abteile, verwendet. Die Innentemperatur wird unterteilt in Tag- und Nachttemperatur. Hier werden als Referenz 18°C und 16°C ganzjährig verwendet. Die Zeiten ohne Produktion, in denen die Innentemperaturen in der Regel abgesenkt werden, werden nicht berücksichtigt. Für die Arbeitshalle wird ein Wert von 12°C eingesetzt. Als Lüftungstemperatur werden 22°C angesetzt. Die Werte für die Außentemperatur werden aus einem Datensatz vom Deutschen Wetterdienst, Station Marnitz (ca. 30 km von Neustadt-Glewe) und die Werte für die Globalstrahlung aus einem Datensatz der Station Seehausen (ca. 55 km südlich von Neustadt-Glewe) verwendet. Von der Station Marnitz sind keine Stundenmittelwerte für die Globalstrahlung verfügbar. Als Umwandlungsfaktor für die Globalstrahlung in fühlbare Wärme wird ein Wert von 70% eingesetzt. Als Durchlässigkeit wird entsprechend der durchgeführten Messungen ein durchschnittlicher Wert von 55% verwendet.

Die Simulation wird mit MS Excel durchgeführt und jeweils für alle Stunden des Jahres berechnet.

## 5.2 Strategien zur Temperaturführung

### 5.2.1 Cool morning

In der Literatur wird „Cool morning“ ein bis zwei Stunden vor Sonnenaufgang begonnen und in die ersten Stunden des Tages hineingezogen. Aus energetischer Sicht ist der Einsatz mit Sonnenaufgang sinnvoll. In dieser Phase werden in der Regel die Schirme geöffnet und die kalte Luft aus dem Dachraum sinkt herab in den Pflanzenbestand. Gleichzeitig entfällt die wärmedämmende Wirkung der Schirme, wodurch die Wärmeabgabe der Gewächshaushülle ansteigt. Dadurch muss das Heizungssystem kurzfristig mit sehr hoher Leistung gegen ein Absinken der Innentemperatur an arbeiten, da die Sonneneinstrahlung zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausreicht, um diese Differenz auszugleichen. Bei einer klassischen Temperaturführung benötigt man gerade für die Morgenstunden sehr hohe Leistungskapazitäten. Senkt man in dieser Phase die Innentemperatur gezielt ab, kann die benötigte Leistung der Heizung reduziert werden.

In den Untersuchungen an der HU Berlin musste die Strategie „Cool morning“ (Temperaturabsenkung am Morgen) eingesetzt werden, um die Temperaturvorgaben einhalten zu können. Dadurch stellte sich heraus, dass der Einsatz dieser Strategie pflanzenbaulich von Vorteil ist, da die Pflanzen kompakter bleiben und damit der Einsatz von Hemmstoffen reduziert werden kann.

### 5.2.2 Temperatursummenstrategie

Die Temperatursummenstrategie ermöglicht es, die Wärme zu dem Zeitpunkt einzusetzen, zu der sie am besten verfügbar ist. Auf den ersten Blick macht diese Strategie in der Gärtnerei Baumgärtner wenig Sinn, da die Kapazitäten bisher erst zur Hälfte ausgenutzt werden. In Abschnitt 4.6 wurde allerdings dargelegt, dass vor allem bei sehr niedrigen Wärmeverbräuchen sehr hohe Leitungsverluste auftreten. Mit der Temperatursummenstrategie ist es möglich, diese niedrigen Verbräuche zu vermeiden.

Bei der Temperatursummenstrategie werden eine Temperaturuntergrenze und eine Temperaturobergrenze festgelegt, die von der jeweiligen Kultur abhängig sind. Zwischen diesen Grenzen darf sich die Temperatur frei bewegen. Wird zum Beispiel bei Poinsettien „Cool morning“ eingesetzt, und die Temperatur am Morgen für zwei Stunden auf 14°C im Vergleich zur üblichen Tag-/Nachttemperatur von 18/16°C abgesenkt, verliert man für die Temperatursumme zweimal 4°C. Dieses Temperaturdefizit muss zu einer anderen Zeit wieder aufgeholt werden. Hier kann zum Beispiel die Lüftungstemperatur von 22°C auf 24°C angehoben werden. Durch das spätere Öffnen der Lüftung bei höherer Sonneneinstrahlung kann das Defizit ausgeglichen werden. Allerdings muss das Temperaturdefizit möglichst zeitnah ausgeglichen werden.

### 5.2.3 Luxuswärmestrategie

Da die Wärme für die Gärtnerei Baumgärtner im Vergleich zu herkömmlichen Heizsystemen verhältnismäßig günstig zur Verfügung steht, sollte im Bezug auf die Regelstrategie nicht zwangsläufig die klassische Temperaturführung angewandt werden. Vielmehr sollte unter dem Gesichtspunkt des optimierten Energieeinsatzes und einer optimierten Pflanzenproduktion geregelt werden. Als Optimierung wird in diesem Zusammenhang eine Anhebung der Durchschnittstemperatur um 2°C angestrebt. Die Machbarkeit unter pflanzenbaulichen Gesichtspunkten wurde an der HU Berlin untersucht. Die energetische Betrachtung erfolgt im Rahmen der Simulation.

## 5.3 Grundannahmen für die Simulation

In der Simulation wird als Referenz jeweils die Tagesdurchschnittstemperatur aus der klassischen Temperaturführung mit 18/16°C und einer Lüftungstemperatur von 22°C verwendet. Die Durchschnittstemperatur wird über einen Zeitraum von 7 Tagen gebildet. Um die Lüftungswirkung zu berücksichtigen, wird im Lüftungsfall 1°C zur Lüftungstemperatur hinzugerechnet. Liegt die Außentemperatur höher als die Lüftungstemperatur, bestimmt sich die Innentemperatur aus der Außentemperatur zuzüglich 1°C. Dadurch ergeben sich je nach Sonneneinstrahlung und Tageslänge sehr unterschiedliche Durchschnittstemperaturen.

Als alternative Regelstrategie in den Produktionsabteilungen werden die bereits dargestellten Strategien kombiniert. Für die Arbeitshalle sind keine Änderungen vorgesehen.

Als „Cool morning“ wird die Temperatur morgens mit dem Öffnen der Energieschirme (Globalstrahlung > 20 W/m<sup>2</sup>) für zwei Stunden auf 14°C abgesenkt. Um die niedrigen Wärmeverbräuche zu vermeiden, wird nur geheizt, wenn für eine Innentemperatur von 14°C Heizbedarf besteht. Durch diese beiden Maßnahmen entsteht gegenüber der Temperatursumme im klassischen Betrieb ein Wärmedefizit, das ausgeglichen werden muss. Dazu wird die Lüftungstemperatur von 22°C auf 24°C angehoben. Durch hohe Sonneneinstrahlung kann so ein Teil des Defizits wieder ausgeglichen werden.

Für die Heizung wird allgemein eine Solltemperatur von 18°C ohne Nachtabsenkung eingehalten. In den Wintermonaten kann dadurch das Defizit in den Nachtstunden wieder ausgeglichen, bzw. sogar eine höhere Temperatursumme erreicht werden.

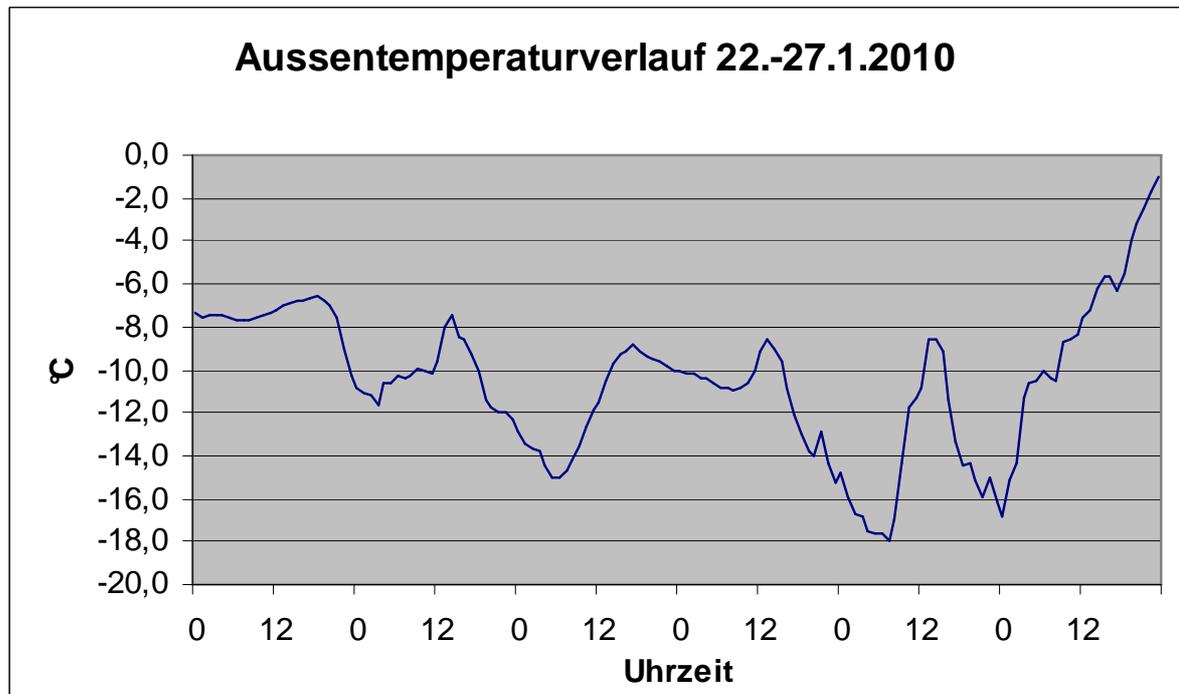
Als Luxuswärmestrategie soll die Durchschnittstemperatur um 2°C höher liegen als in der klassischen Betriebsweise. Dadurch ergeben sich weitere Probleme, da bereits die Solltemperatur von 18°C gegenüber der erhöhten Durchschnittstemperatur ein Defizit verursacht. Daher muss die Innentemperatur zum Ausgleich weiter angehoben werden. Im Haus 2 liegen die Wärmeverbräuche bei geschlossenen Schirmen deutlich unter den Tagesverbräuchen. Daher werden in der Simulation die Temperaturen am Abend nach dem Schließen der Schirme auf 22°C angehoben. Im Haus 3 sind die Wärmeverbräuche nachts höher, als am Tag. Daher wird hier die Temperatur bereits am Tag mit einer Verzögerung von einer Stunde nach „Cool morning“ auf 22°C angehoben. Die Temperaturerhebung erfolgt jeweils so lange, bis das Defizit ausgeglichen, bzw. bis ein Puffer von etwa drei Stunden aufgebaut ist. Der Puffer ist notwendig, da es sonst zu permanenten Schwankungen der Innentemperatur kommen würde.

Zusammenfassend werden in der Simulation verschiedene Varianten verglichen. Zum einen die klassische Temperaturführung (18°C/ 16°C, 22°C Lüftungstemperatur), zum anderen die Kombination aus „Cool morning“ und Temperatursumme (Solltemperatur 18°C, morgens 2h 14°C, Wärmebereitstellung nur, wenn für eine Solltemperatur von 14°C Heizbedarf besteht, 24°C Lüftungstemperatur). Außerdem wird eine „Luxusvariante“ berechnet, die in den Grundannahmen der eben beschriebenen Kombination aus „Cool morning“ und Temperatursumme besteht, aber die Durchschnittstemperatur um 2K angehoben wird (Solltemperatur 18°C, bei Temperaturdefizit 22°C). Zum Vergleich werden zusätzlich die Gesamtwärmeverbräuche für die erhöhte Durchschnittstemperatur mit der klassischen Temperaturführung dargestellt.

## 5.4 Ergebnisse

### 5.4.1 Temperaturen und Wärmeverbrauch im Winter

Der Vergleich des Innentemperaturverlaufs im Winter wird anhand der Daten aus der Woche vom 22. bis zum 27. Januar 2010 dargestellt. Diese Woche war für die Region Neustadt-Glewe sehr extrem. Die Außentemperaturen lagen in dieser Woche durchgehend bei Werten zwischen  $-6\text{ °C}$  und  $-18\text{ °C}$ . Der Verlauf der Außentemperatur in diesem Zeitraum ist in Abbildung 41 dargestellt.



**Abb. 41: Außentemperaturverlauf vom 22. – 27.01.2010**

In Abbildung 42 wird der Verlauf der Innentemperaturen im Haus 3 für diesen Zeitraum gezeigt. Die blaue Linie stellt den Verlauf für die klassische Temperaturführung mit  $18\text{ °C}/16\text{ °C}$  Tag- / Nachttemperatur dar, die rote Linie die Luxuswärmestrategie in Verbindung mit „Cool morning“ und Temperatursumme. Während bei der klassischen Variante am Morgen mit dem Öffnen des Energieschirms die Innentemperatur auf  $18\text{ °C}$  angehoben wird, wird sie bei der Luxusvariante für zwei Stunden auf  $14\text{ °C}$  gesenkt. Nach diesen beiden Stunden steigt der Sollwert ebenfalls auf  $18\text{ °C}$ . Sinkt die Durchschnittstemperatur der Luxusvariante auf weniger als  $2\text{ K}$  über der Durchschnittstemperatur der klassischen Variante, wird die Innentemperatur für einige Stunden auf  $22\text{ °C}$  angehoben. Die zugehörigen Wärmeverbräuche für diesen Zeitraum sind in Abbildung 42 dargestellt. Bei der klassischen Variante kann man den Zeitpunkt, zu dem der Energieschirm geöffnet wird, an einem sehr deutlichen Ansteigen des Wärmeverbrauchs erkennen. Die Steigerung liegt bei etwa  $30\text{ bis }50\text{ W/m}^2$  Gewächshausfläche. Durch den Anstieg der Außentemperatur und dem Heizbeitrag durch die Sonneneinstrahlung fällt der Wärmeverbrauch danach wieder ab. An den ersten beiden dargestellten Tagen schwanken die Außentemperaturen weniger stark und auch die Einstrahlung ist nicht besonders hoch, weshalb auch das Absinken des Wärmeverbrauchs in den Tagesstunden nicht so stark ausfällt. Am vorletzten Tag fällt dieser Prozess sehr deutlich aus. Hier sinkt der Wärmeverbrauch am Tag deutlich unter die Werte während der Nacht. Am Nachmittag steigen die Verbräuche dann wieder deutlich an, bis es durch das Schließen des Energieschirms wiederum zu einem leichten Absinken kommt. Bei der Luxusvariante wird der starke Anstieg im

Wärmeverbrauch am Morgen nach dem Öffnen des Energieschirms durch das Absenken der Innentemperatur fast vollständig aufgefangen. Allerdings muss dann später zum Erfüllen der Luxustemperatursumme die Innentemperatur und damit auch der Wärmeverbrauch angehoben werden. Die benötigten Leistungen fallen aber nicht so hoch aus, wie in der klassischen Variante nach dem Öffnen des Schirms.

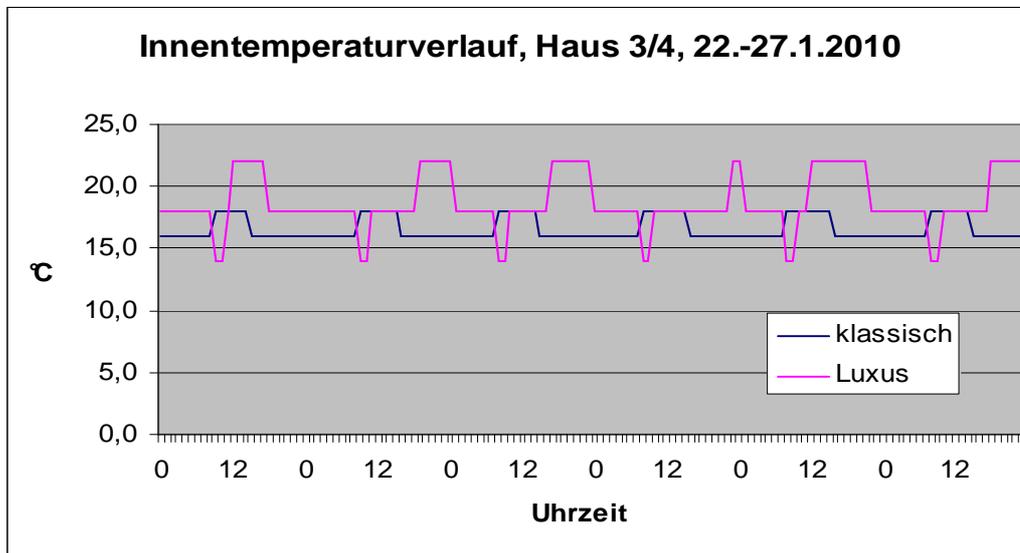


Abb. 42: Innentemperaturverlauf im Haus 3 für den Zeitraum vom 22. – 27.01.2010

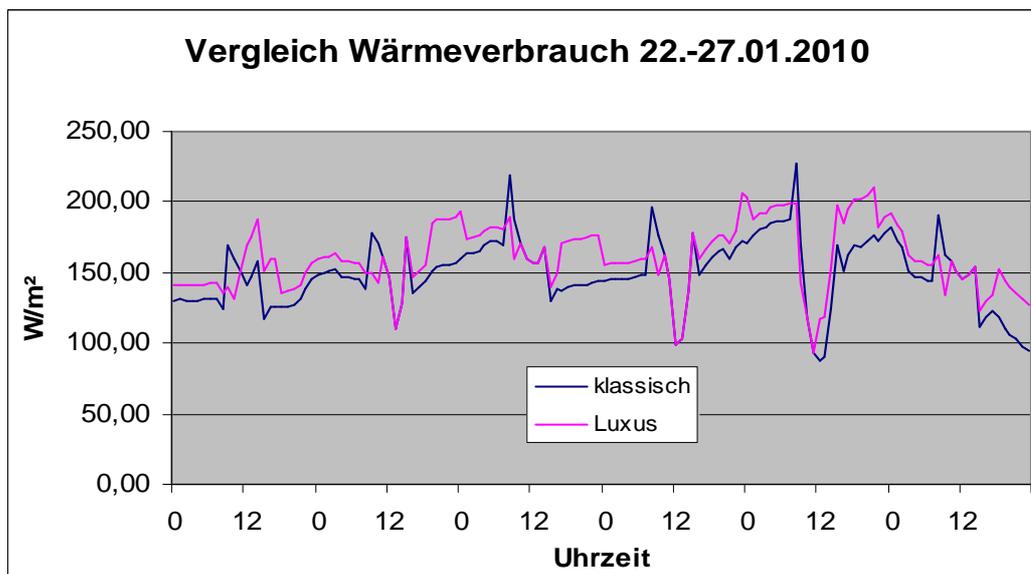


Abb. 43: Wärmeverbrauch im Haus 3 für den Zeitraum vom 22. – 27.01.2010

Der Temperaturverlauf im Haus 2 für diesen Zeitraum ist in Abbildung 44 dargestellt. Die blaue Linie stellt wiederum die klassische Temperaturführung dar, die rote Linie die Luxusvariante. Bei der Luxusvariante erkennt man morgens ebenfalls die Temperaturabsenkung auf 14 °C. Hier wird allerdings die Temperatursumme erst am Abend nach dem Schließen der Energieschirme mit einer Anhebung der Innentemperatur auf 22 °C ausgeglichen. Die Begründung für diesen Ansatz liegt im Wärmeverbrauch. In Abbildung 45 sind die Wärmeverbräuche für das Haus 2 dargestellt. Durch die beiden Schirme (Energieschirm und Verdunkelung) wird das Abteil nachts so gut isoliert, dass der

Wärmeverbrauch am Tag trotz höherer Außentemperaturen und Sonneneinstrahlung deutlich höher ist, als in den Nachtstunden. Außerdem wird der Wärmeverbrauch durch die Anhebung der Innentemperatur auf 22 °C nur um etwa 20 Wh/m<sup>2</sup> erhöht.

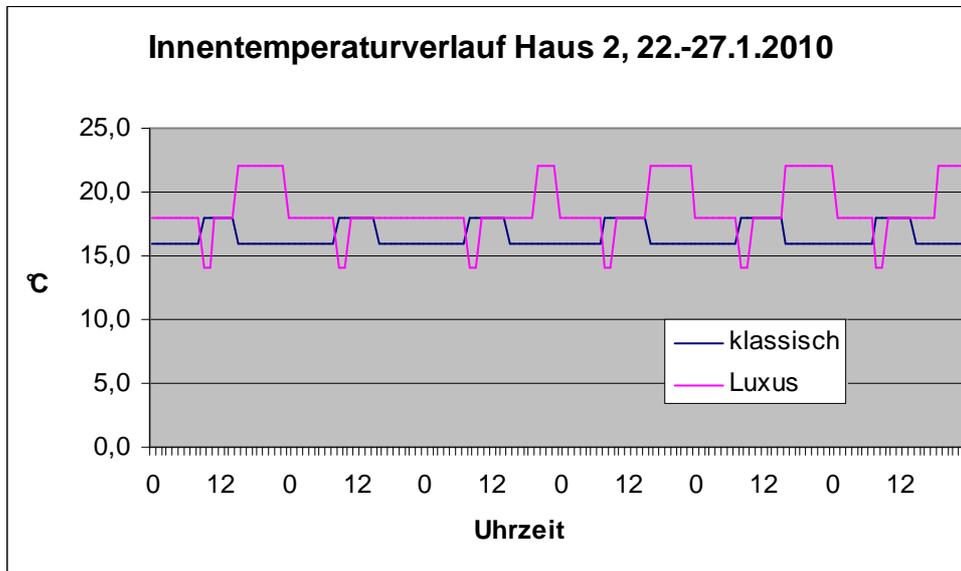


Abb. 44: Innentemperaturverlauf im Haus 2 für den Zeitraum vom 22. – 27.01.2010

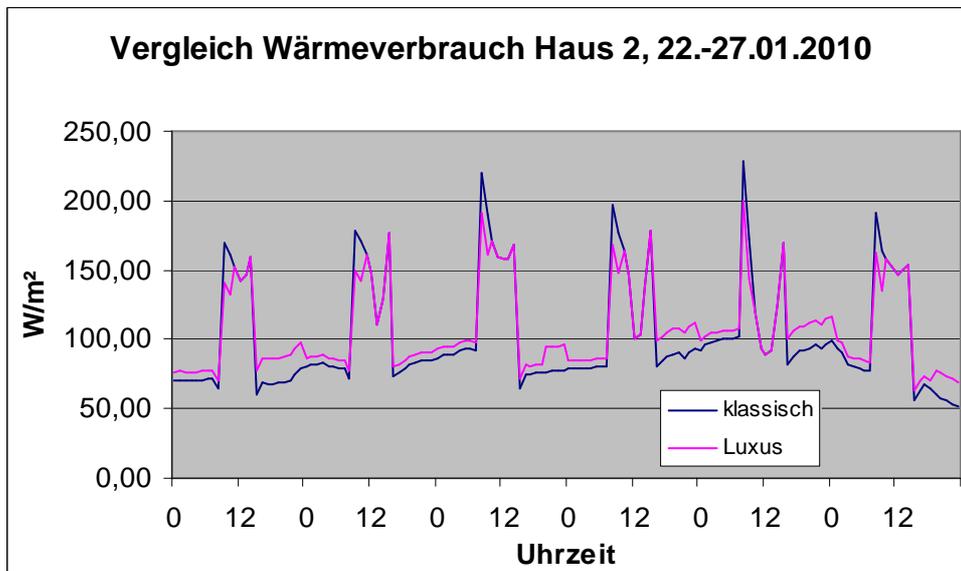
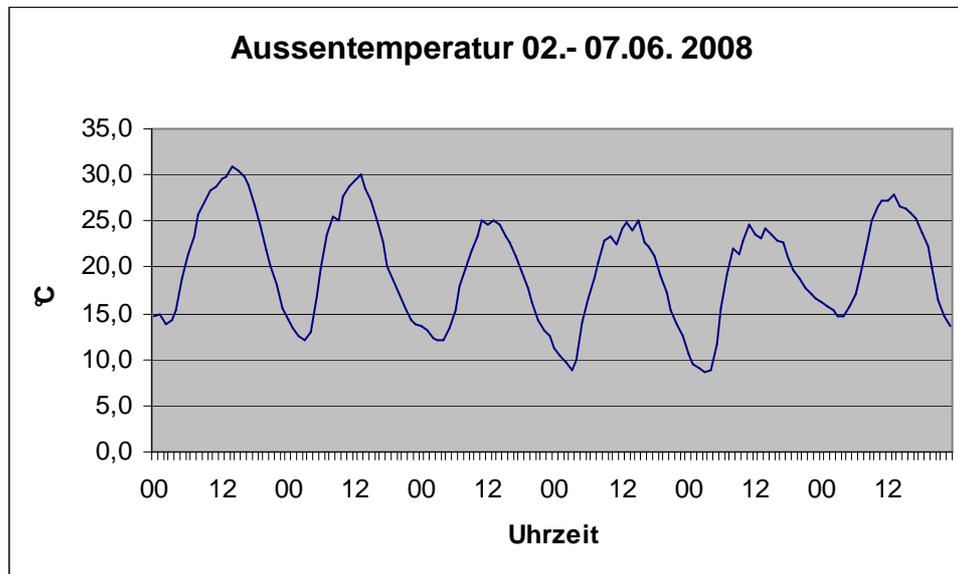


Abb. 45: Wärmeverbrauch im Haus 2 für den Zeitraum vom 22. – 27.01.2010

Der starke Anstieg des Wärmeverbrauchs am Morgen nach dem Öffnen der Schirme fällt wieder durch die Temperaturabsenkung um 20 – 30 W/m<sup>2</sup> niedriger aus, als in der klassischen Variante. Allerdings ist im Haus 2 der Unterschied beim Wärmedurchgang zwischen der Doppelfolie und den zusätzlichen zwei Schirmen so hoch, dass es nach dem Öffnen der Schirme trotzdem zu einem sehr starken Anstieg im Wärmeverbrauch und damit der Heizleistung kommt.

### 5.4.2 Temperaturen und Wärmeverbrauch im Sommer

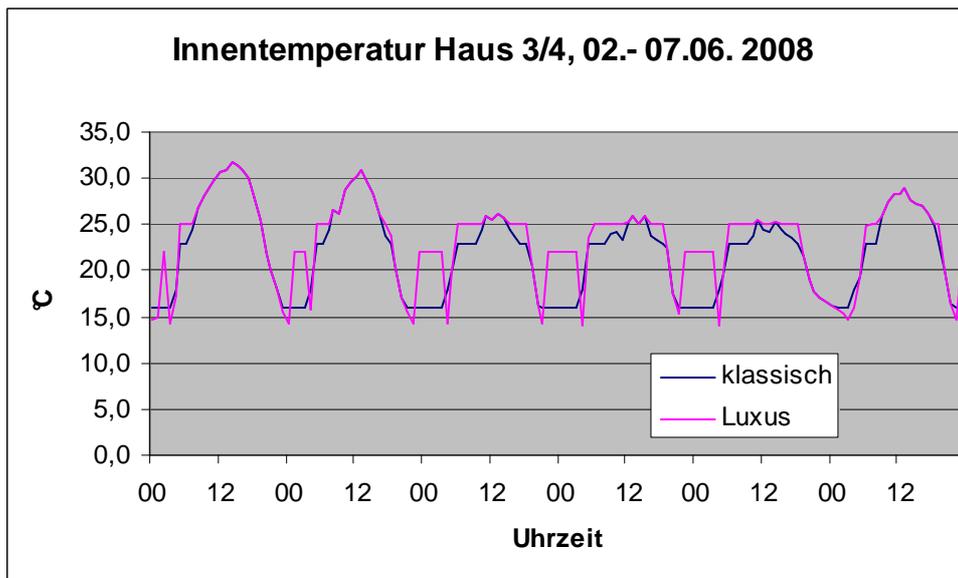
Die Situation im Sommer wird anhand der Daten vom 02. bis 07. Juni 2008 aufgezeigt. In dieser Woche schwankten die Außentemperaturen zwischen 10 °C und 31 °C. Der Verlauf der Außentemperatur ist in Abbildung 46 dargestellt. Diese Tage zeichnen sich vor allem durch hohe Temperaturschwankungen von 15 K aus. Am Tag liegen die Temperaturen der Luft jeweils zwischen 25 °C und 30 °C, während sie nachts auf 9 °C bis 15 °C abkühlt.



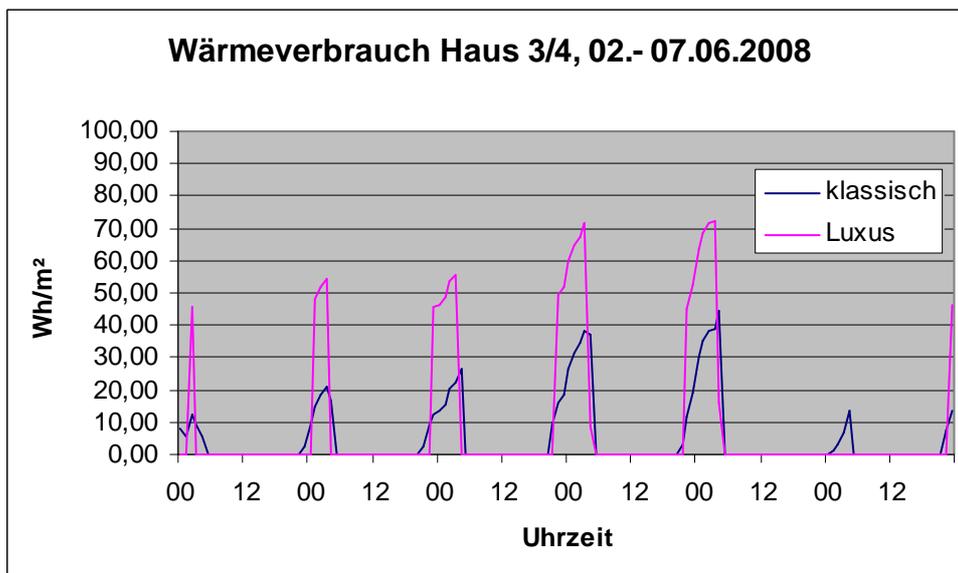
**Abb. 46: Außentemperaturverlauf vom 02. – 07.06.2008**

Der Verlauf der Innentemperatur im Haus 3 ist in Abbildung 47 dargestellt. Sowohl bei der klassischen Variante, als auch bei der Luxusstrategie überschreiten in diesem Zeitraum die Innentemperaturen am Tag sehr schnell den Lüftungswert. Hier verlaufen die Temperaturen der klassischen Variante und der Luxusstrategie weitgehend identisch. Ein „cool morning“ lässt sich in dieser Phase auch nur noch sehr begrenzt realisieren, da die Außentemperaturen am Morgen bereits sehr nahe an den 14 °C liegen und die Einstrahlungswerte am Morgen sehr schnell ansteigen und damit das ganze Haus aufheizen.

In den wenigen Nachtstunden besteht aber trotz der hohen Temperaturen am Tag Heizbedarf. Der Verlauf des Wärmeverbrauchs ist in Abbildung 48 dargestellt. Der Wärmebedarf liegt in dieser Zeit zwischen 10 und 40 W/m<sup>2</sup> in der klassischen Variante. Bei der Luxusstrategie, bei der über die Temperatursumme versucht wird, die Durchschnittstemperatur der klassischen Variante um 2 K zu erhöhen, wird das Abteil die gesamte Nacht auf 22 °C geheizt. Nur in der letzten Nacht, vom 06. auf den 07. Juni, entfällt das Aufheizen, da hier die Außentemperatur bei fast 15 °C liegt, und damit kein Heizbedarf besteht.



**Abb. 47: Innentemperaturverlauf im Haus 3 für den Zeitraum vom 02. – 07.06.2008**



**Abb. 48: Wärmeverbrauch im Haus 3 für den Zeitraum vom 02. – 07.06.2008**

Im Haus 2 ergibt sich für diesen Zeitraum ein ähnliches Bild. Der Verlauf der Innentemperaturen ist aus den bereits geschilderten Gründen identisch mit dem Verlauf aus Haus 3. Die Wärmeverbräuche (Abb. 49) beschreiben einen ähnlichen Verlauf wie in Haus 3, nur auf einem niedrigeren Niveau. Allerdings gibt es auch hier bei der klassischen Variante einen starken Anstieg des Wärmeverbrauchs nach dem Öffnen der Schirme. Diese Situation kann durch ein späteres Öffnen vermieden werden, da die Einstrahlung sehr schnell den gesamten Wärmebedarf deckt.

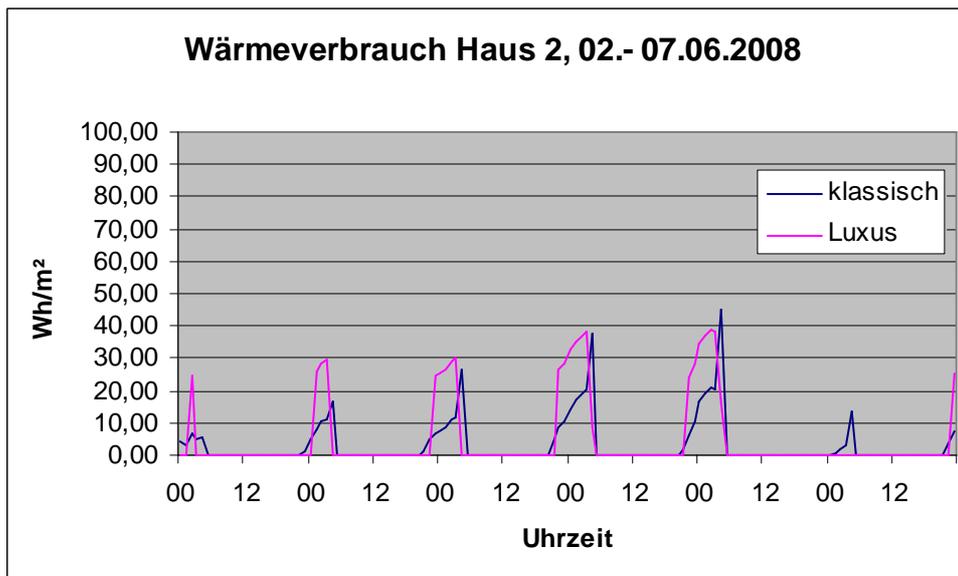


Abb. 49: Wärmeverbrauch im Haus 2 für den Zeitraum vom 02. – 07.06.2008

### 5.4.3 Luxuswärmestrategie

In den Wintermonaten funktioniert die Luxuswärmestrategie offensichtlich mit einem geringen Mehraufwand an Energie sehr gut. In den Sommermonaten gibt es aber – wie in Abschnitt 5.4.2 bereits dargestellt - ein Problem, die erhöhte Temperatursumme zu erfüllen, da die Innentemperaturen bei Wärmebedarf durchgehend auf 22 °C gehalten werden. In Abbildung 50 ist die Abweichung der Durchschnittstemperatur bei der Anwendung der Luxusstrategie im Vergleich zur Durchschnittstemperatur der klassischen Temperaturführung dargestellt. Die rote Linie stellt die Differenz zwischen den beiden Durchschnittstemperaturen dar. Bis etwa Mitte Mai und dann wieder ab Mitte September schwingt der Wert um 2 K. Zwischen Mai und September kommt es zu sehr hohen Abweichungen. Die blaue Linie stellt den Verlauf der Außentemperatur dar (Werte \*10).

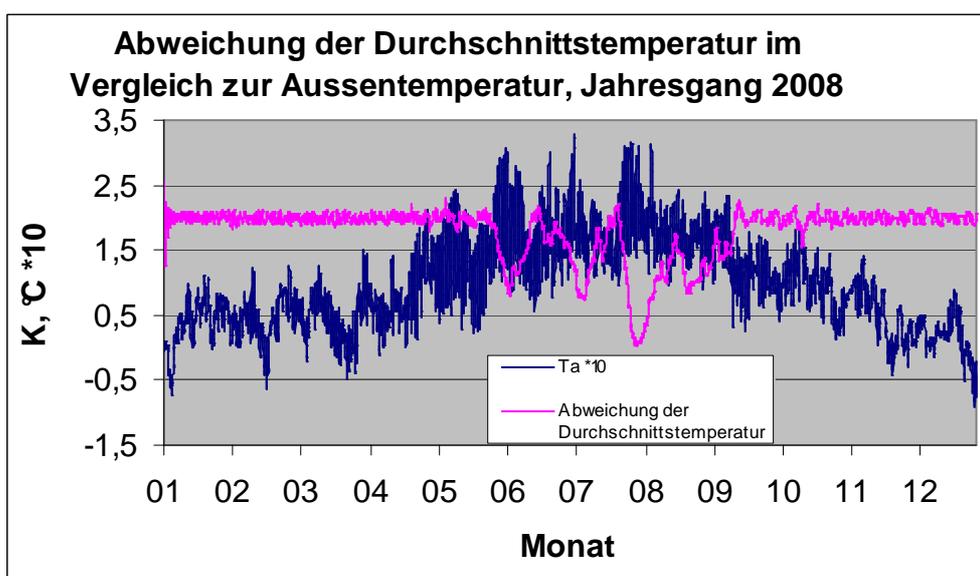


Abb. 50: Abweichung der Durchschnittstemperatur bei Anwendung der Luxuswärmestrategie zur klassischen Temperaturführung, im Vergleich zur Außentemperatur; Jahresgang 2008

Die Durchschnittstemperatur bei einer klassischen Temperaturführung von 18 °C / 16 °C schwankt im Jahresverlauf zwischen 16,4 °C und 17,5 °C, bedingt durch die Tageslänge. In den Sommermonaten werden aber die Innentemperaturen weniger durch den Heizungssollwert sondern durch die Außentemperaturen und die hohe Sonneneinstrahlung bestimmt. Im Zeitraum vom 02. bis 07.06.2008, der in den Diagrammen 46 bis 49 dargestellt ist, liegt die durchschnittliche Innentemperatur im Haus 3 zwischen 21,3 °C und 22,5 °C. Damit liegt die durchschnittliche Innentemperatur bereits im Bereich der Lüftungstemperatur im klassischen Betrieb und im Bereich des maximalen Heizungssollwerts der Luxusstrategie. Für die Luxusstrategie wird aber eine um 2 K erhöhte Durchschnittstemperatur angestrebt. Diese würde folglich zwischen 23,3 °C und 24,5 °C liegen. Betrachtet man den Verlauf der Innentemperaturen (Abb. 47) im Haus 3, sieht man, dass sie am Morgen sehr schnell die Lüftungstemperatur erreichen. In der Luxusvariante gibt es sowohl morgens als auch abends jeweils einen kurzen Zeitraum, in denen sich die höhere Lüftungstemperatur auf die Durchschnittstemperatur auswirken kann. Die Auswirkungen auf die Durchschnittstemperatur sind aber gering. Um diese anzuheben, muss die ganze Nacht hindurch geheizt werden. Aber selbst eine Temperatur von 24 °C würde in dieser Zeit nicht ausreichen um die Vorgaben für die Durchschnittstemperatur zu erfüllen. Außerdem ist der Energieaufwand in dieser Zeit des Jahres etwa doppelt so hoch als bei der klassischen Temperaturführung. Verzichtet man in dieser Jahreszeit auf die Temperaturanhebung auf 22 °C und belässt den Heizungssollwert auf 18 °C im Heizfall (Abb. 51), liegt die Durchschnittstemperatur dennoch die meiste Zeit des Sommers um 0,5 bis 1,5 K höher. Der Wärmeverbrauch liegt dann aber in einer vergleichbaren Größenordnung. Die Programmierung der Temperatursumme ist in diesem Fall auf die Luxuswärmestrategie ausgerichtet. Daher findet hier keine Nachtabsenkung auf 16 °C statt. Bei einer reinen Temperatursummensteuerung würde natürlich die Temperatur bei erfüllter Temperatursumme entsprechend abgesenkt. Dadurch kommt es zu den Abweichungen der Durchschnittstemperaturen.

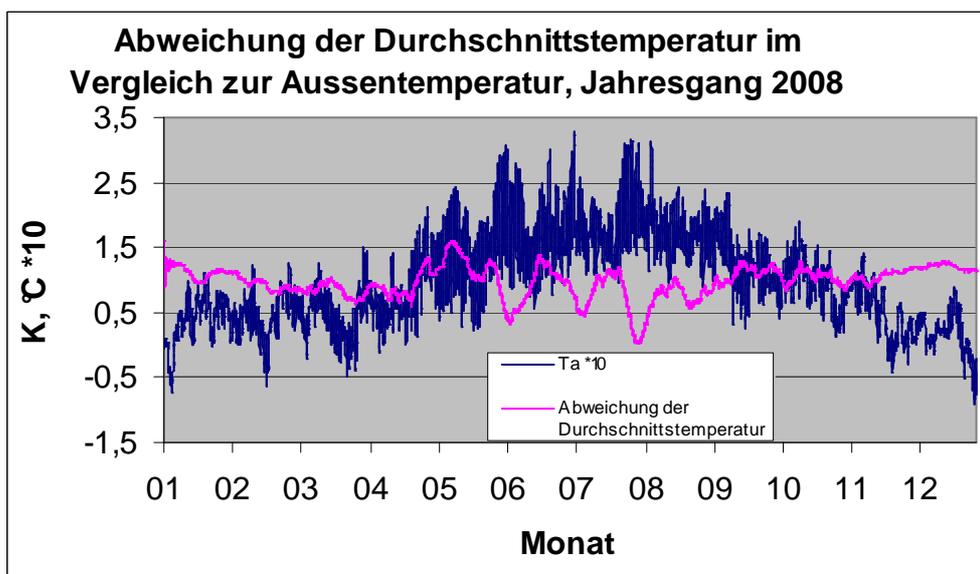


Abb. 51: Abweichung der Durchschnittstemperatur bei Anwendung von *Cool morning* und einer maximalen Heiztemperatur von 18 °C zur klassischen Temperaturführung, im Vergleich zur Außentemperatur; Jahresgang 2008

Die Werte für das Haus 2 sind mit den Werten aus Haus 3 vergleichbar, da sich die bessere Isolierung durch die Verdunkelung nicht auf die Durchschnittstemperatur auswirkt. Daher werden die Werte für Haus 2 nicht extra dargestellt.

#### 5.4.4 Gesamtwärmeverbrauch und Wärmeleistung

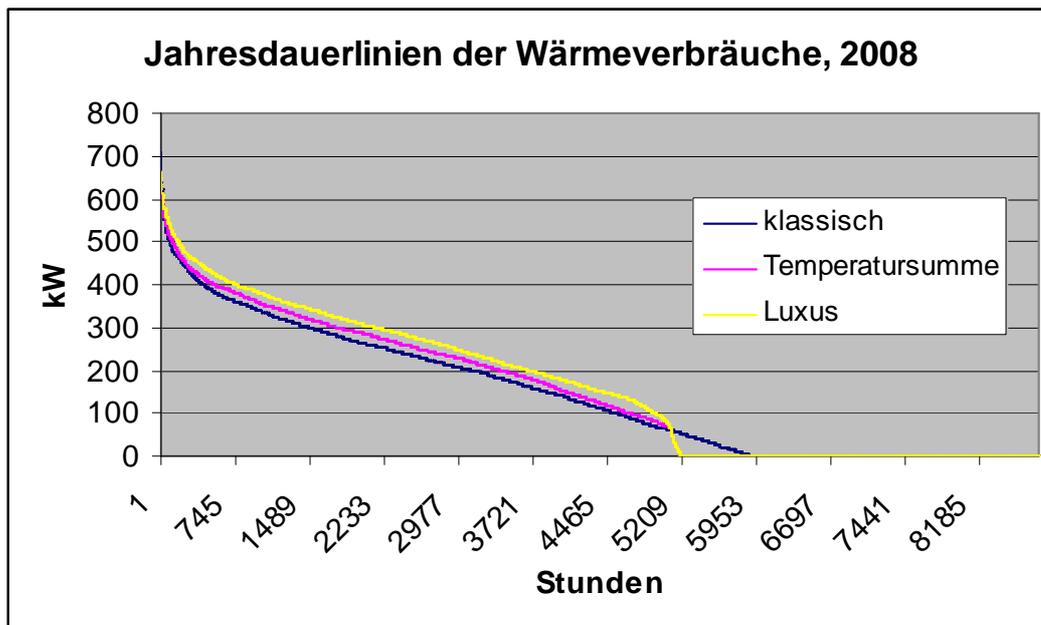


Abb. 52: Jahresdauerlinie der Heizleistungen im Jahr 2008

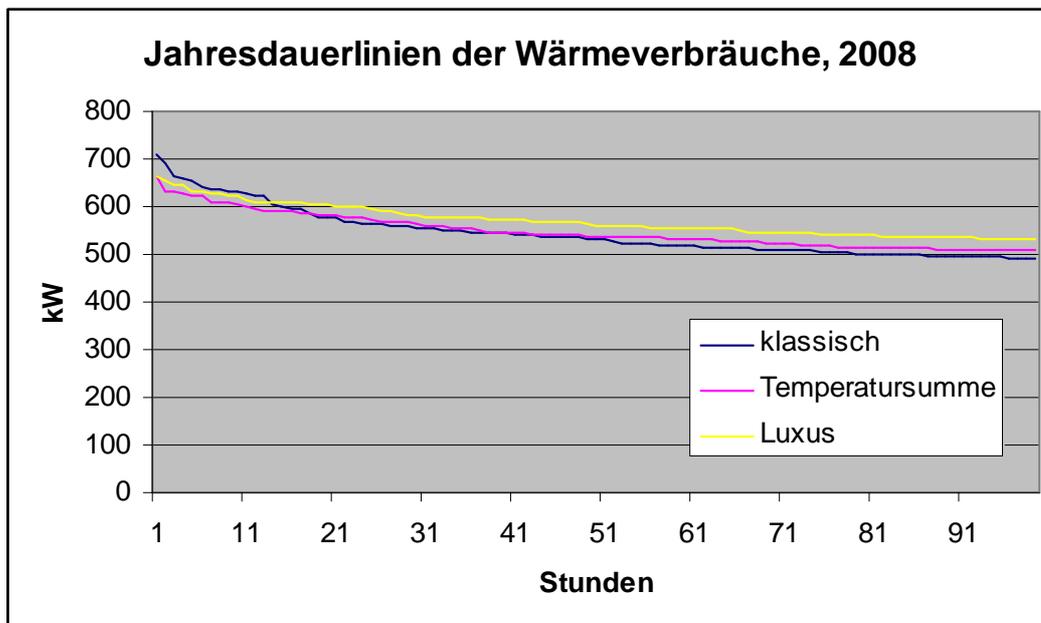


Abb. 53: Ausschnitt der 100 höchsten Heizleistungen aus der Jahresdauerlinie 2008

In Abbildung 52 sind die Heizleistungen aus dem Jahr 2008 als Jahresdauerlinie dargestellt. Abbildung 53 zeigt die einhundert höchsten Werte der Heizleistung aus dem Jahr 2008 mit höherer

Auflösung. Die blaue Linie stellt wieder die klassische Temperaturführung mit 18 °C / 16 °C dar. Die gelbe Linie zeigt die benötigten Heizleistungen der Luxuswärmestrategie. Mit der roten Linie werden die Heizleistungen für die Temperatursummenstrategie ohne Temperaturanhebung dargestellt.

Die höchsten im Jahr 2008 benötigten Heizleistungen liegen zwischen 600 und 700 kW. Allerdings treten diese hohen Werte nur in etwa 20 Stunden auf. Daher fällt die Kurve in diesem Bereich stark ab. Die Höchstwerte werden bei einer klassischen Temperaturführung erreicht. Diese Werte treten in der Regel am Morgen nach dem Öffnen der Energieschirme auf, wenn die Außentemperaturen nach einer klaren Winternacht noch sehr niedrig sind und die Sonneneinstrahlung noch nicht sehr hoch. In der Luxusvariante werden diese Werte durch den Einsatz von „Cool morning“ reduziert. Die Höchstwerte der Luxusvariante liegen daher etwa 50 kW niedriger. Allerdings muss dann im Laufe des Tages die Temperatursumme ausgeglichen werden. Daher werden die etwas niedrigeren Heizleistungen in ihrer Anzahl erhöht. Insgesamt verläuft die Kurve der Luxusstrategie etwas flacher, als die klassische Variante. Die Kurve für die Temperatursummenstrategie verläuft weitgehend parallel zur Luxusvariante.

Bei etwa 5200 Stunden knicken die beiden Kurven der Luxusvariante und der Temperatursummenstrategie nach unten ab, während die Kurve der klassischen Variante mit gleichbleibender Steigung ausläuft. In der Luxusvariante wird nur geheizt, wenn für eine Innentemperatur von 14 °C Heizbedarf besteht, wobei die Solltemperatur dann bei mindestens 18 °C liegt. Die wenigen niedrigen Heizleistungen treten während der morgendlichen Temperaturabsenkungen auf. Insgesamt reduziert sich durch diese Strategie die Anzahl der Heizstunden um etwa 700 im Vergleich zur klassischen Temperaturführung.

In den Abbildungen 54 und 55 sind die Heizleistungen für das Jahr 2009 dargestellt. In diesem Jahr lagen vom 18. bis 20. Dezember die Außentemperaturen durchgehend unter -10 °C. Daraus resultieren die deutlich höheren Maximalwerte. Diese liegen für die klassische Variante bei 955 kW und für die Luxusvariante bei 1023 kW. In diesem Fall treten die absoluten Höchstwerte nicht am Morgen, sondern am Nachmittag auf, kurz bevor die Schirme geschlossen werden. Die Außentemperatur ist zu diesem Zeitpunkt bereits auf -13 °C abgesunken, aber die Einstrahlung liegt noch knapp über dem Schwellwert für die Schirme. In diesem Fall liegt die Heizleistung der Luxusvariante höher als die für die klassische Temperaturführung, da zu dieser Tageszeit im Haus 3 bereits die Innentemperatur auf 22 °C angehoben wurde. An dieser Stelle wäre es sinnvoll in der Regelung für die Luxustemperaturführung, die Anhebung der Innentemperatur für die Temperatursumme durch die Außentemperatur zu begrenzen. Als weitere Maßnahme könnte auch die Schirmsteuerung zusätzlich zur Einstrahlung mit der Außentemperatur verknüpft werden. Das würde im Winter sowohl am Morgen, als auch am Nachmittag die extremen Lastspitzen puffern. Würden in diesem Fall die Schirme bereits bei 30 W/m<sup>2</sup> statt bei 20 W/m<sup>2</sup> geschlossen, würde sich die Spitzenlast um etwa 150 kW reduzieren.

Insgesamt waren die Wintermonate 2009 deutlich kälter als 2008. Während im Jahr 2008 nur etwa 20 Stunden Werte von über 600 kW Heizleistung notwendig waren, sind es 2009 annähernd 100 Stunden. Der Rest des Jahres ist weitgehend vergleichbar. Die gesamte Anzahl an Heizstunden ist 2009 sogar niedriger als 2008. In der Luxusvariante reduziert sich wiederum die Anzahl der Heizstunden gegenüber der klassischen Variante um etwa 700 Stunden. Durch diese Reduzierung der Heizstunden werden auch die Laufzeiten der Umwälzpumpen der einzelnen Heizkreise

(ca. 3500 Watt Anschlussleistung) und der Luftheizer (ca. 4500 Watt Anschlussleistung) und damit auch der Stromverbrauch reduziert.

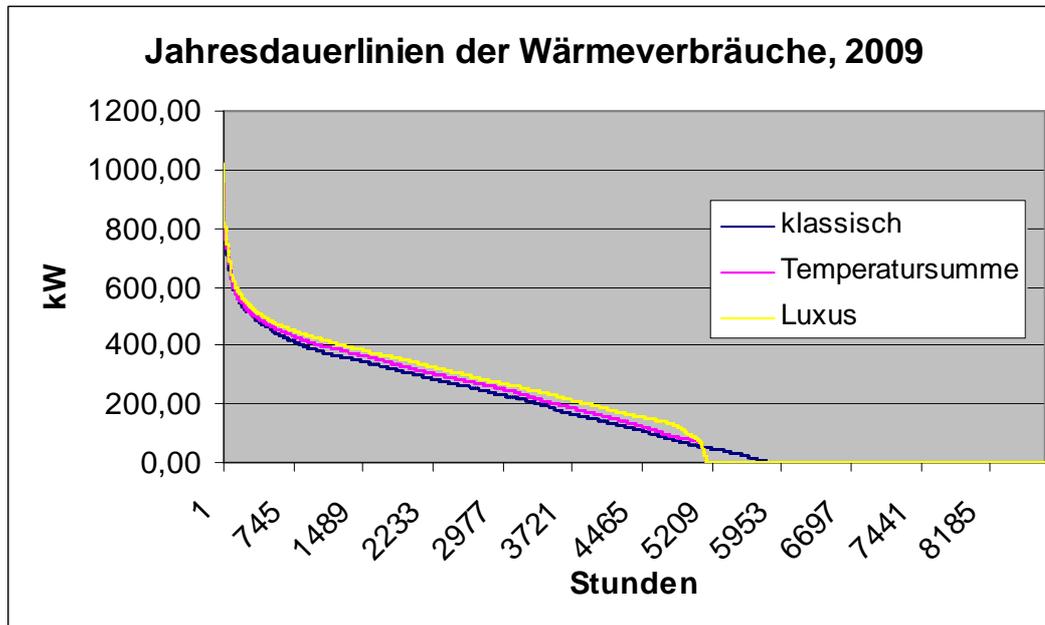


Abb. 54: Jahresdauerlinie der Heizleistungen im Jahr 2009

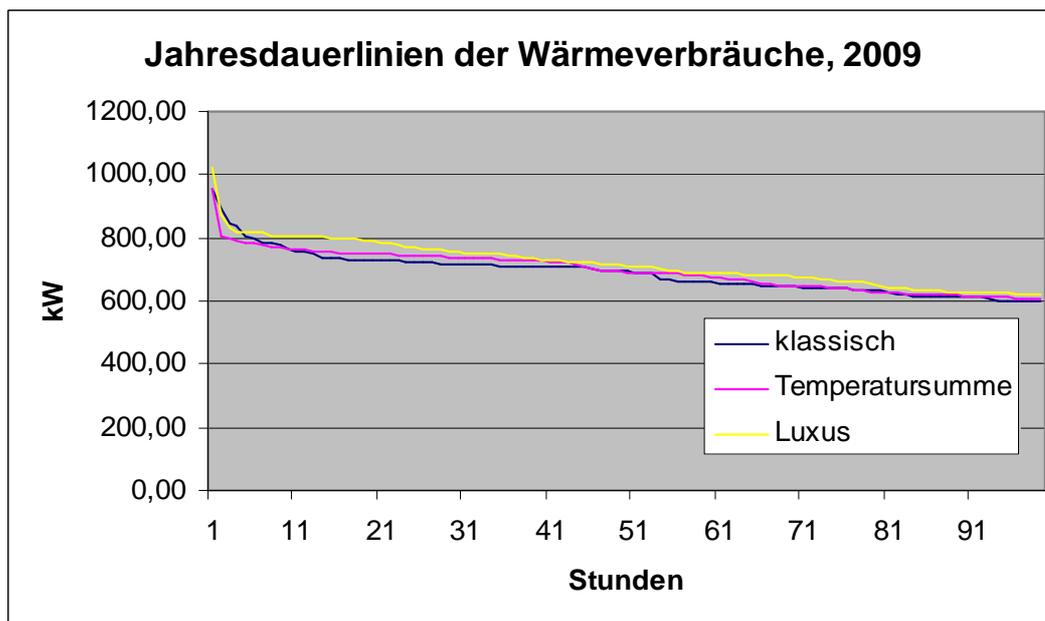


Abb. 55: Ausschnitt der 100 höchsten Heizleistungen aus der Jahresdauerlinie 2009

In den Tabellen 4 und 5 sind die Gesamtwärmeverbräuche der Jahre 2008 und 2009 dargestellt. Demnach liegt der Wärmeverbrauch für eine klassische Temperaturführung mit 18 °C /16 °C für 2008 bei 1249 MWh und für das kältere Jahr 2009 bei 1402 MWh. Die Luxus-temperaturversorgung führt jeweils zu einer Erhöhung um etwa 190 MWh. Wendet man die Luxusstrategie ohne die Anhebung der Innentemperatur auf 22 °C an, erhöht sich der Wärmeverbrauch um ca. 67 MWh. Hebt man die Durchschnittstemperatur bei einer klassischen Temperaturführung um zwei Grad an (20°C/18°C), erhöht sich der Wärmeverbrauch jeweils um ca. 220 MWh.

Im unteren Teil der Tabellen sind jeweils für alle Varianten noch die Gesamtwärmeverbräuche aufgeführt, die sich ergeben würden, wenn Haus 3/4 mit einer Verdunkelung nachgerüstet werden würde. Die Einsparung liegt jeweils bei ca. 20%. Die Rentabilität einer derartigen Investition muss allerdings in Abhängigkeit vom Wärmepreis entsprechend überprüft werden. Für den Fall einer Erweiterung der Gewächshausanlage kann diese Investition allerdings durch die Reduzierung der benötigten maximalen Heizleistung der bestehenden Anlage, zusätzliche Kapazitäten freisetzen.

		2008	
Klimaführung:		Wärmeverbrauch	Heizbedarf
klassisch		1248,57 MWh	5920 h
T Summe		1314,23 MWh	5202 h
Luxus		1435,83 MWh	5202 h
klassisch Luxus		1476,76 MWh	6310 h
Nachrüstung Verdunkelung Haus 3			
klassisch		986,71 MWh	
T Summe		1004,23 MWh	
Luxus		1089,35 MWh	
klassisch Luxus		1160,00 MWh	

**Tab. 4: Jahreswärmeverbrauch 2008 der verschiedenen Varianten**

		2009	
Klimaführung:		Wärmeverbrauch	Heizbedarf
klassisch		1401,66 MWh	5817 h
T Summe		1469,09 MWh	5156 h
Luxus		1587,18 MWh	5165 h
klassisch Luxus		1625,58 MWh	6194 h
Nachrüstung Verdunkelung Haus 3			
klassisch		1118,35 MWh	
T Summe		1138,70 MWh	
Luxus		1221,25 MWh	
klassisch Luxus		1288,28 MWh	

**Tab. 5: Jahreswärmeverbrauch 2009 der verschiedenen Varianten**

#### 5.4.5 Einsparung fossiler Energieträger

In der Gewächshausanlage der Gärtnerei Baumgärtner in Neustadt-Glewe sollte nachgewiesen werden, dass eine CO<sub>2</sub>-neutrale Produktion von hochwertigen Zierpflanzen möglich ist.

Das Erdwärmewerk gibt seine Wärmelieferung pro Jahr mit ca. 98% aus Erdwärme an. Die restlichen 2% müssen in den wenigen Spitzenlaststunden und während Wartungsarbeiten aus Erdgas bereitgestellt werden. Dieser Anteil lässt sich nicht vermeiden, wenn eine Versorgungssicherheit gewährleistet werden soll. Verrechnet man diesen Prozentsatz mit den im vorhergehenden Abschnitt dargestellten Wärmeverbräuchen, ergeben sich daraus bei klassischer Temperaturführung Wärmeverbräuche von 1223,6 MWh für das Jahr 2008 und 1373,6 MWh für das Jahr 2009. Diese Wärmemengen werden demnach aus Geothermie und damit CO<sub>2</sub>-neutral bereitgestellt. Bei einem

Heizwert von 10 kWh/l Heizöl EL ergibt sich daraus eine Einsparung von 122.360 l Heizöl für 2008 und 137.360 l Heizöl für 2009.

#### 5.4.6 Erweiterungspotential

	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Maximalwert 2008 [W/m <sup>2</sup> ]	Maximalwert 2009 [W/m <sup>2</sup> ]	Maximalwert 2010 [W/m <sup>2</sup> ]
Haus 2	1126,40	152,24	214,97	200,00
Haus 3/4	2355,20	180,37	242,87	214,84
Gesamt klassisch [kW]		709,01	955,87	1020,69
Gesamt Luxus [kW]		661,48	1023,54	920,53

**Tab. 6: Maximale Heizleistungen der Jahre 2008, 2009 und 2010**

In Tabelle 6 sind die maximalen Heizleistungen für die gesamte Anlage und für die einzelnen Produktionsabteile aufgeführt. Für 2008 und 2009 ist jeweils das ganze Jahr berücksichtigt. 2010 endet der verfügbare Klimadatensatz am 19. Februar. Allerdings lag in diesem Zeitraum eine Kälteperiode mit Temperaturen bis -18 °C.

Die maximale Heizleistung lag mit 1021 kW für die klassische Temperaturführung im Jahr 2010. Die Luxusvariante erreichte im Jahr 2009 mit 1024 kW das Maximum. Im Abschnitt 5.4.4 wurde bereits auf verschiedenen Maßnahmen hingewiesen, mit deren Hilfe diese Werte noch um etwa 150 kW reduziert werden können.

Die derzeit installierte Nahwärmeleitung hat eine Kapazität von 2100 kW. Mit den in der Simulation erreichten Maximalwerten für die Heizleistung bleiben damit noch etwa 1080 kW verfügbar. Die Kapazität ist damit etwa zur Hälfte ausgeschöpft.

Die Maximalwerte aus den Produktionsabteilen liegen für das Haus 3/4 bei 243 W/m<sup>2</sup> im Jahr 2009 und bei 215 W/m<sup>2</sup> im Jahr 2010. Das Haus 2 erreicht Werte von 215 W/m<sup>2</sup> 2009 und 200 W/m<sup>2</sup> im Jahr 2010. Die Werte aus 2009 lassen sich, wie bereits beschrieben, durch entsprechende Schirmsteuerung noch senken. Setzt man als Schließbedingung eine Einstrahlung von 30 W/m<sup>2</sup>, sinken die Werte auf 183 W/m<sup>2</sup> in Haus 2 und auf 211 W/m<sup>2</sup> in Haus 3/4. Die Werte aus 2010 können nur durch eine zusätzliche Kopplung der Schließbedingung an die Außentemperatur optimiert werden. Diese Werte treten morgens nach dem Öffnen der Schirme bei bereits abgesenkter Innentemperatur auf 14 °C auf. Die Einstrahlung für diesen Zeitpunkt beträgt 63 W/m<sup>2</sup>, die Außentemperatur liegt bei -17 °C. Da sich diese Bedingungen nur sehr schwer vermeiden lassen, werden diese Werte für die Berechnung des Erweiterungspotentials verwendet.

Ausgehend von 1080 kW zusätzlich verfügbarer Heizleistung kann die Gewächshausanlage demnach rechnerisch noch um 5400 m<sup>2</sup> mit der Ausstattung von Haus 2 oder etwa 5000 m<sup>2</sup> mit der Ausstattung von Haus 3/4 erweitert werden. Das entspricht jeweils der doppelten Fläche des Abteils 3/4 und damit in etwa einer Verdoppelung der Gesamtfläche.

Wird die maximale Heizleistung konsequent durch eine zusätzliche Schirmsteuerung über die Außentemperatur weiter reduziert, wird die verfügbare Wärmeleistung um 150 kW auf 1230 kW erhöht. In diesem Fall könnte das Gewächshaus um 6150 m<sup>2</sup> erweitert werden, bei einer Ausstattung mit Energieschirm und Verdunkelung. Das entspricht zusätzlich noch einmal der Fläche von Haus 2. Bei einer Ausstattung nur mit Energieschirm reicht die freie Wärmekapazität rechnerisch für 5700 m<sup>2</sup>. Damit fehlen ca. 100 m<sup>2</sup> für die zusätzliche Erweiterung um die Fläche von Abteil 2. Für die getroffene Annahme von 215 W/m<sup>2</sup> wäre das eine fehlende Heizleistung von 21,5 kW. Rechnet man diesen Wert auf die erweiterte Gesamtanlage mit fast 11.500 m<sup>2</sup> um, entfallen pro m<sup>2</sup> Gewächshausfläche 2 Watt Heizleistung. Das entspricht etwa 1% der kalkulierten Heizleistung. Bei einer abzudeckenden Temperaturdifferenz von 35 K würde die Temperatur um 0,35 °C absinken. Dieses geringe Defizit wird durch die Speicherwirkung des Betonbodens leicht ausgeglichen.

#### 5.4.7 Wirtschaftlichkeit

Die Gewächshausanlage der Gärtnerei Baumgärtner in Neustadt-Glewe musste an eine ungewöhnliche Heizsituation angepasst werden. Durch das niedrige Temperaturniveau musste vor allem die Wärmeabgabefläche in den Produktionsabteilungen erhöht werden. Diese Erhöhung erfolgte durch den Einbau einer Fußbodenheizung, die in einen Ebbe-Flut-Betonboden integriert ist. Für kurzfristige Temperaturschwankungen und Lastspitzen wurden zusätzlich Luftheizer installiert. Für die Wärmebereitstellung waren außerdem Investitionen in einen Edelstahlwärmetauscher und ein Kostenbeitrag für die Nahwärmetrasse notwendig. Außerdem musste für eine sinnvolle Wärmenutzung in einen Energieschirm und in eine Anpassung des Regelcomputers investiert werden. Die Investitionen, die somit direkt der neuartigen Wärmeversorgung zugewiesen werden können, belaufen sich damit auf ca. 300.000,- €. Nimmt man eine Nutzungsdauer von 15 Jahren und einen Zinsansatz von 5 % an ergibt sich daraus eine Annuität von 28.900,- €.

Dieser Betrag ist nun mit den Einsparungen über den Wärmepreis zu vergleichen. Dazu werden in der folgenden Tabelle die Gesamtkosten für die Wärmeverbräuche aus den Jahren 2008 und 2009 für eine klassische Temperaturführung bei unterschiedlichen Wärmepreisen dargestellt. Als Referenzwert für die Kosten einer Ölheizung werden 0,05 € pro kWh angenommen.

		Wärmeverbrauch	Preis pro kWh Wärme in €			
			0,02	0,03	0,04	0,05
2008	1248,57 MWh	24.971,40	37.457,10	49.942,80	62.428,50	
2009	1401,66 MWh	28.033,20	42.049,80	56.066,40	70.083,00	

**Tab. 7: Heizkosten bei unterschiedlichen Wärmepreisen**

In Tabelle 8 sind die jeweiligen Einsparungen im Vergleich zu den Brennstoffkosten von Heizöl dargestellt. Bei einem Wärmepreis von 0,02 € pro kWh Wärme liegen die Einsparungen um 8.500,- bis 13.00,- € höher als die Annuität. Für einen Wärmepreis von 0,03 € pro kWh reichen dagegen die Einsparungen nicht aus um die Annuität zu decken. Für das Jahr 2009, in dem der Wärmeverbrauch deutlich höher war, liegen die Einsparungen aber nur knapp unter dem Wert der Annuität. Die

Wärmepreise, bei denen die Annuität gerade abgedeckt wird, liegt für den Wärmeverbrauch aus dem Jahr 2008 bei 0,026 € pro kWh und für den Wärmeverbrauch von 2009 bei 0,029 € pro kWh.

	Preis pro kWh Wärme in €		
	0,02	0,03	0,04
2008	37.457,10	24.971,40	12.485,70
2009	42.049,80	28.033,20	14.016,60

**Tab. 8: Einsparungen bei den Heizkosten im Vergleich zu Heizöl**

Im Falle einer Erweiterung der Gewächshausanlage sollte sich die Kostenstruktur weiter zu Gunsten der Erdwärme verschieben, da die Wärmebereitstellung bereits auf eine größere Anlage ausgelegt ist und daher keine zusätzlichen Investitionen mehr notwendig werden.

## 6. Auswirkungen auf das Erdwärme-Heizkraftwerk

Das Erdwärme-Heizkraftwerk Neustadt-Glewe fördert in der Stunde bis zu 110 m<sup>3</sup> Thermalwasser mit einer Temperatur von 98 °C aus einer Tiefe von 2250 m. Durch den hohen Druck in dieser Tiefe steigt das Thermalwasser bis etwa 200 m unter der Erdoberfläche. Von dort wird das Wasser mit einer Tauchpumpe (Nennleistung 140 kW) an die Oberfläche gepumpt und dort den Wärmetauschern zur Auskopplung der Wärme zugeführt. Dieses Thermalwasser hat einen sehr hohen Salzgehalt von 220 g/l (vgl. Meerwasser 30 g/l) und kann bis auf 35 °C abgekühlt werden, ohne dass sich das Wasser chemisch verändert. So können bis zu 6,5 MW Wärme gewonnen werden. Die Wärme wird über eine Fernwärmeleitung zu vielen privaten und gewerblichen Kunden transportiert. Das örtliche Lederwerk wird zusätzlich mit Prozesswärme versorgt. Seit November 2003 wird in der wärmeren Jahreszeit zusätzlich Strom erzeugt. Bei geringer Wärmeabnahme durch die Kunden wird mit der Wärme in einem weiteren Wärmetauscher ein organisches Fluid verdampft, dessen Siedepunkt bei ca. 30 °C liegt. Mit diesem Dampf wird eine Turbine betrieben, die bis zu 230 kW elektrische Leistung für das örtliche Stromnetz liefert. Im Winter wird das Kraftwerk abgeschaltet und die gesamte Wärme geht in das Fernwärmenetz. Als Notfallkessel und zur Abdeckung von Lastspitzen steht ein Gaskessel mit einer Leistung von 10,4 MW bereit. Dieser deckt nach Auskunft der Heizkraftwerksbetreiber etwa 2 % der jährlich produzierten Wärme. Der Rest wird aus Erdwärme gewonnen.

Die Problematik bei der Geothermie liegt darin, dass man sie im Gegensatz zu einem Heizkessel nicht beliebig drosseln kann. Bedingt durch die Pumpenleistungen, gibt es eine gewisse Mindestabnahmemenge. In diesem Fall liegt diese bei 40 m<sup>3</sup> pro Stunde. Das bedeutet aber auch, dass die Wärme möglichst vollständig genutzt werden sollte, wenn der Aufwand der Förderung betrieben wird. Kann die Wärmemenge nicht vollständig genutzt werden, muss das Thermalwasser aktiv über Kühltürme abgekühlt werden, da für die Rückführung des Thermalwassers in die Erde ein gewisser Temperaturunterschied notwendig ist, damit das Wasser ohne zusätzlichen Aufwand wieder zurückgeführt werden kann. Im anderen Fall muss das Wasser mit hohem Energieaufwand wieder in die Erde gepumpt werden. Aus diesem Grund ist eine Gärtnerei mit Gewächshausanlagen in unmittelbarer Nähe zum Heizwerk ein interessanter Wärmekunde, da in Gewächshausanlagen auch im Sommer geheizt werden muss. Außerdem kann in diesem Fall Wärme verkauft werden, die sonst mit Energieaufwand ungenutzt entsorgt werden muss. In diesem Fall liegt die Gärtnerei nur wenige Meter vom Heizwerk entfernt. Daher war es hier auch möglich die Gärtnerei als nachgeschalteten Kunden im Niedertemperaturbereich an das Wärmenetz anzuschließen. Der große Vorteil für den Gärtner an dieser Konstellation ist, dass die Wärme in der Regel deutlich günstiger zu beziehen ist, als in einem normalen Hochtemperaturnetz. Der konkrete Wärmepreis zwischen dem Erdwärme-Heizwerk und der Gärtnerei Baumgärtner ist nicht bekannt, liegt aber deutlich unter dem Bezugspreis für Wärme aus Heizöl (0,05 €/kWh). Nimmt man den Wärmeverbrauch aus der Simulation für das Jahr 2009 mit 1402 MWh, kann das Heizwerk bei einem Wärmepreis von z.B. 2,0 Eurocent/kWh einen Umsatz von 28.040 € erzielen. Bei einem Preis von 3,0 Eurocent/kWh würde der Umsatz bei 42.060 € liegen.

## 7. Übertragbarkeit auf andere Betriebe

Die Ausstattung der Gewächshausanlage der Gärtnerei Baumgärtner in Neustadt-Glewe ist auf eine Wärmeversorgung mit Vorlauftemperaturen von 55 °C ausgerichtet. Die Fußbodenheizung ist in einen Ebbe-Flut-Betonboden integriert. Da die Topfpflanzen direkt auf dem Boden kultiviert werden, ist die Übertragung der Wärme auf die Pflanzen sehr gut. Allerdings kann dadurch die Vorlauftemperatur für die Fußbodenheizung nicht beliebig erhöht werden, um eine noch bessere Wärmeabgabe zu erreichen. Die Kombination mit den Luftheizern zum Ausgleich von Lastspitzen hat sich ebenfalls bewährt. Das Gesamtsystem ist somit gut geeignet für den Umgang mit einem Wärmeangebot im höheren Niedertemperaturbereich.

Der höhere Niedertemperaturbereich von Abwärmequellen stellt eine interessante Nische dar, da die Zahl der potentiellen Kunden in diesem Bereich sehr gering ist. Als Wärmelieferanten kommen hier neben Erdwärme-Heizkraftwerken, auch kleinere Blockheizkraftwerke oder Biogasanlagen mit begrenztem Wärmeangebot in Frage. Das Versorgungskonzept von Neustadt-Glewe, in dem aus dem Rücklauf der Fernwärmeleitung die Restwärme für die Gärtnerei ausgekoppelt wird, wird sich allerdings nur in Verbindung mit Geothermie finden, da hier die Betreiber durch die stärkere Abkühlung des Thermalwassers einen zusätzlichen Vorteil haben. In klassischen Heizkraftwerken mit Verbrennungsprozessen muss das stärkere Auskühlen durch einen Mehraufwand von Brennstoff wieder ausgeglichen werden. Außerdem wird dort die Fernwärme in den meisten Fällen bei einem höheren Druck aus der Turbine entnommen, was zu einer Reduzierung des Stromertrags führt. Allerdings haben auch diese Heizkraftwerke über eine Rauchgaskondensation oder aus Turbinenabdampf Wärmemengen auf diesem Temperaturniveau verfügbar, die nur selten genutzt werden. Das Angebot an potentiellen Abwärmelieferanten ist somit sehr hoch.

Das Hauptproblem stellen aber in den meisten Fällen die großen Entfernungen zwischen der Gärtnerei als Wärmeabnehmer und dem Heizwerk als Lieferanten dar. Gerade im Niedertemperaturbereich sollten die Transportentfernungen möglichst gering sein. Dies hat zur Folge, dass in der Regel die Gärtnerei zur Wärmequelle siedeln muss und damit ein vollständiger Neubau notwendig wird. Und dieser Schritt ist in der Regel mit sehr hohen Investitionen verbunden. Zusätzlich werden die Investitionen noch durch die speziellen Anforderungen der Niedertemperaturwärme gesteigert, die sich erst über die Jahre durch einen günstigeren Wärmepreis wieder amortisieren. Ein weiteres Problem in diesem Zusammenhang ist, dass potentielle Wärmelieferanten häufig in Industriegebieten in der Nähe ihrer Hauptkunden angesiedelt sind. Dadurch sind dort selten passende Grundstücke für den Bau einer Gewächshausanlage verfügbar oder sind als Gewerbegrundstück bzw. als Bauerwartungsland für einen Gartenbaubetrieb weitgehend unbezahlbar. In diesem Zusammenhang bieten die derzeit geplanten und zum Teil schon entstehenden Erdwärmewerke im süddeutschen Raum ein großes Potential, da sich diese meistens in Randlagen befinden. Auch Biogasanlagen sind hier sehr geeignet, da sich diese in den meisten Fällen sogar auf landwirtschaftlichen Flächen außerhalb von Siedlungsgebieten befinden.

Der Wärmepreis, den ein Gärtner am Ende zu bezahlen hat, ist natürlich neben dem Verhandlungsgeschick auch von anderen Faktoren abhängig, zum Beispiel wird eine Beteiligung an den Investitionen für den Wärmetransport in der Regel mit einem geringeren Wärmepreis vergütet. Der Gärtner muss an dieser Stelle natürlich seine eigenen Investitionen und auch seine geplanten Kulturen berücksichtigen, um den für ihn gültigen maximalen Preis herauszufinden. Je höher der

Wärmebedarf der Kulturen desto eher lohnen sich hohe Investitionen in eine günstige Bezugsquelle für Wärme.

Die behandelten Temperaturführungsstrategien *Cool morning* und Temperatursumme sind in den meisten Regelcomputern verfügbar und können auch in jeder Gärtnerei in Abhängigkeit von den Kulturen eingesetzt werden. Ein *Cool morning* kann eben auch neben den pflanzenbaulichen Aspekten am Morgen eingesetzt werden, um die anfallenden Lastspitzen beim Öffnen der Energieschirme abzufangen. Und der Einsatz der Temperatursummenstrategie kann auch in einem gewissen Rahmen die Aufgaben eines Pufferspeichers übernehmen. Hier wird eben die Temperatur an die Wärmemenge angepasst und nicht die Wärmemenge an die Temperaturen. Allerdings ist diese Vorgehensweise stark von den produzierten Kulturen abhängig, da jede Kultur auf diese zum Teil hohen Temperaturschwankungen anders reagiert. *Euphorbia pulcherrima* und *Pelargonium zonale* haben in den durchgeführten Versuchen durchaus positiv auf die Kombination dieser Strategien mit einer zusätzlichen Anhebung der Durchschnittstemperaturen reagiert.

Die Gesamtbewertung der Frage, ob sich der untersuchte Betrieb Baumgärtner als „gutes Beispiel“ für die Nutzung von Abwärmequellen zur CO<sub>2</sub> –neutralen Beheizung von Gewächshäusern eignet, ist uneingeschränkt positiv, weil sowohl die verwendete Technik als auch der Investitionsrahmen in einem für die Praxis tragbaren Rahmen angesiedelt sind. Die Betriebssicherheit der Anlage ist im Grunde genommen sogar höher als die eines Betriebes mit eigenständiger Energieversorgung und die Ausfallsicherheit ist wegen des großen Puffervermögens und der guten Isolierung der Anlage größer als in einem konventionellen Betrieb.

## 8. Zusammenfassung

Die Gärtnerei Baumgärtner produziert am Standort Neustadt-Glewe wärmebedürftige Topfpflanzen, die hauptsächlich über Gartencenter in Berlin und Hamburg vertrieben werden. Das Gewächshaus in Neustadt-Glewe wurde im Jahr 2007 neu gebaut. Dabei handelt es sich um ein Venlo-Gewächshaus mit aufgeblasener Doppelfolie. Die Produktionsabteile sind mit einem Energieschirm ausgestattet. Etwa ein Drittel der Fläche kann zusätzlich noch verdunkelt werden.

Für die Wärmeversorgung ist das Gewächshaus über eine Nahwärmeleitung mit einem Erdwärme-Heizkraftwerk verbunden. Dort wird aus dem Rücklauf des bestehenden Fernwärmenetzes die Restwärme ausgekoppelt und der Gärtnerei bereitgestellt. Die Vorlauftemperatur für das Gewächshaus ist mit 55 °C garantiert und unterliegt witterungsbedingten Schwankungen.

Bei einer Vorlauftemperatur von 55 °C kann ein Gewächshaus nicht über ein herkömmliches Heizsystem beheizt werden. Dazu wurden die Produktionsflächen mit einem Betonboden mit integrierter Fußbodenheizung ausgestattet. Die Zuleitungen dienen zusätzlich als Rohrheizung. Für Lastspitzen und zum Ausgleich von Temperaturschwankungen sind zusätzlich Luftheizer mit perforierten Ausblässläuchen installiert. Die Arbeitshalle ist nur mit Luftheizern ausgestattet. Im Produktionsbereich wird das Haus auf 18 °C/16 °C Tag- / Nachttemperatur geheizt. Der Boden dient gleichzeitig zur Bewässerung durch Anstauen.

Bei umfangreichen Messungen des Wärmeverbrauchs der Gewächshausanlage traten wiederholt Unregelmäßigkeiten in der Temperaturverteilung auf. Bei geschlossenem Energieschirm bildete sich unter dem Schirm ein deutlicher Temperaturgradient. Die Wärme aus den Luftheizern erreichte nicht den Pflanzenbestand, sondern sammelte sich unter dem Schirm. Dadurch wurde die energiesparende Wirkung des Energieschirmes weitgehend aufgehoben. Durch Umbau der Ausblässläuche konnte dieses Problem behoben werden. In diesem Zug wurde auch die Heizungsregelung umgestellt und der Bodenheizung eine höhere Priorität zugewiesen.

Die Bestimmung der Wärmeverbräuche gestaltete sich sehr schwierig, da die Vorlauftemperatur des Gesamtsystems nicht konstant war, und zusätzlich die einzelnen Heizkreise für die Bodenheizung und die Luftheizer mit verschiedenen Temperaturen betrieben werden mussten. Erst durch den Einsatz von Ultraschallmessgeräten zur Bestimmung der Wasserdurchflussmengen in allen Heizkreisen konnten die einzelnen Wärmeverbräuche zufriedenstellend bestimmt werden.

Durch Auswertung der Wärmeverbräuche in Verbindung mit den Klimadaten wurden die U'-Werte bestimmt. Dabei ergab sich für die Doppelfolie ein Wert von 4,8 W/m<sup>2</sup>\*K, mit einfachem Energieschirm ein Wert von 3,7 W/m<sup>2</sup>\*K und für den Energieschirm zusammen mit der Verdunkelung ein Wert von 2,0 W/m<sup>2</sup>\*K.

In einer Simulation wurden die Wärmeverbräuche mit den Klimadaten aus den Jahren 2008 und 2009 analysiert. Dazu wurde als erste Variante die klassische Temperaturführung mit 18 °C/16 °C Tag-/Nachttemperatur berechnet. Als weitere Variante wurde eine Kombination aus Cool Morning und Temperatursummenstrategie gerechnet, bei der gleichzeitig die Durchschnittstemperatur um 2 °C angehoben wurde (Luxuswärmeversorgung). Außerdem wurde in dieser Variante eine Strategie eingesetzt, bei der geringe Wärmeverbräuche vermieden werden sollen, indem nur ab einem

gewissen Mindestverbrauch geheizt wird. Dadurch sollen hohe Leitungsverluste beim Wärmetransport vom Kraftwerk zur Gärtnerei vermieden werden. Dafür wird im Heizfall durchgehend auf 18 °C, und im Falle einer nicht erfüllten Temperatursumme auf 22 °C geheizt.

Durch die Luxuswärmeversorgung lässt sich die Durchschnittstemperatur im Winterhalbjahr problemlos um 2 °C anheben. Im Sommerhalbjahr ist es nicht möglich die entsprechenden Übertemperaturen zu erreichen. Der Wärmeverbrauch erhöht sich in dieser Variante um etwa 15% im Jahr.

Als weiteres Ergebnis der Simulation sollten die Energieschirme nicht ausschließlich über die Sonneneinstrahlung gesteuert werden, sondern in den Wintermonaten zusätzlich über die Außentemperatur. Dadurch können bei sehr niedrigen Außentemperaturen die hohen Heizlasten am Morgen stark reduziert werden.

Der Einsatz von Cool Morning reduziert ebenfalls die Lastspitzen am Morgen nach dem Öffnen der Schirme. Gleichzeitig bleiben die Pflanzen kompakter im Wuchs.

Basierend auf den Ergebnissen der Berechnungen wurde das Potential für eine mögliche Gewächshausenerweiterung überprüft. Eine Verdoppelung der bisher bestehenden Fläche stellt demnach kein Problem dar, sowohl bei einer Ausstattung mit nur einem Energieschirm als auch bei einer Ausstattung mit Energieschirm und Verdunkelung.

In einem Unterauftrag wurden an der HU Berlin die Auswirkungen der Luxuswärmeversorgung auf das Pflanzenwachstum von verschiedenen Sorten *Euphorbia pulcherrima* und von Pelargonium zonale getestet. Die Euphorbien haben durchweg positiv auf die bessere Wärmeversorgung reagiert. Die Pflanzen wurden höher, bildeten mehr Trockenmasse, größere Blattflächen und stärkere Triebe. Insgesamt reagierten sie mit einer, für den Verkauf, besseren Qualität.

Bei den Pelargonien reagierte nur eine Sorte durchweg positiv auf die Temperaturerhöhung. Bei den anderen Sorten profitierten nur die generativen Pflanzenteile. Es kann aber von einer deutlichen Kulturzeitverkürzung ausgegangen werden.

## 9. Abstract

The horticultural nursery Baumgärtner is producing pot plants with high heat requirements at the location Neustadt-Glewe. The plants are mainly sold to garden center chains in Berlin and Hamburg. The Venlo-greenhouse in Neustadt-Glewe was built in 2007. It is covered with an inflated double film plastic. The production area is fitted with an energy screen and about one third of the area with an extra black-out screen.

For the heat supply the greenhouse is connected to a geothermal power plant by a heat pipeline. The power plant distributes the waste heat, which is still in the return of the local district heat pipeline to the nursery. The flow of the greenhouse heating system is guaranteed to 55 °C, but it is fluctuating depending to the weather because of the variable heat load on the district heating.

With a flow temperature of 55 °C a greenhouse cannot be heated by a conventional heating system. Therefore the production area is fitted with a concrete floor with an integrated floor heating. In order to compensate fluctuating temperatures and peak loads there are air heaters with perforated plastic film tubes installed. The working area is only fitted with air heaters. The growing area is heated to day and night temperatures of 18 °C and 16 °C. The irrigation is done by a flood-and-drain system, which is also integrated to the concrete floor.

When the heat consumption of the greenhouse was measured, a non-uniform temperature distribution was discovered. On the one hand the heat from the air heaters did not reach the plants on the floor and on the other hand the warm air concentrated by natural ascendancy below the energy screen. Because of this concentration, the energy saving effect of the energy screens was diminished. The problem could be solved by reorganization of the perforated plastic film tubes and by giving a higher priority to the floor heating in the climate control.

The heat consumption was measured and the different coefficients of the heat consumption  $U'$  were calculated. The values are 4.8 W/m<sup>2</sup>K for double film plastic, 3.7 W/m<sup>2</sup>K for the single energy screen and 2.0 W/m<sup>2</sup>K if the darkening screen is also closed.

According to the climate data of the years 2008 and 2009 the heat consumption was analyzed by a simulation. The first variant was a classic temperature strategy with 18 °C during the daytime and 16 °C in the night. The second variant was a combination of cool morning and a temperature sum strategy. Additionally the average temperature was raised by 2 K. Another aspect of these variant was to avoid low heat consumptions, because of high percental losses in the heat pipeline from the power plant to the greenhouse. So in this variant the heating starts if a certain load is necessary. In case of heating the greenhouse is continuously heated to 18 °C and if the temperature sum has to be fulfilled, it is heated to 22 °C.

In the winter months it is possible to raise the average temperature with this strategy by 2 K. During the summertime it is not possible in this range. The heat consumption is increased in this strategy by 15 %.

Another result of the simulation was, that the energy screens should be controlled not only according to the solar radiation, but also to the outside temperature. If the outside temperatures are

very low in winter, the peak load in the morning could be reduced by this control strategy. The cool morning strategy is also reducing the peak loads in the morning.

According to the results of the simulation the potential to enlarge the greenhouse was calculated. With the available heat load, it is possible to duplicate the size of the actual greenhouse, equipped with a single energy screen.

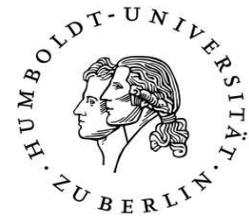
In a sub-order there were made some experiments at the HU Berlin to compare the effects of the two heating strategies on plant grow of different varieties of *Euphorbia pulcherrima* and *Pelargonium zonale*. The higher average temperature, combined with cool morning, had a positive effect on all varieties of *Euphorbia pulcherrima*. The plants grew higher, built more dry mass, a larger leaf area and stronger shoots. Altogether the quality for sale got better.

From *Pelargonium zonale* only one variety reacted completely positive to the higher temperatures. To the other varieties the higher temperatures had only a better effect to the generative parts of the plants. But the time to produce the plants could be reduced significantly.

# **Abschlussbericht**

## **06UM009**

### **Teil II**



**„Nutzung der Restwärme einer Geothermie-Anlage zur CO<sub>2</sub>-neutralen Beheizung eines Gewächshauskomplexes“ – 06UM009**

- Abschlussbericht für den Unterauftrag „Phytomonitoring“ -

- Auftragnehmer: Technische Universität München  
Wissenschaftszentrum Weihenstephan für  
Ernährung, Landnutzung und Umwelt  
Forschungsdepartment für Pflanzenwissenschaften  
Fachgebiet Technik im Gartenbau  
Dürnast 4  
85354 Freising
- Unterauftragnehmer: Humboldt-Universität zu Berlin  
Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät  
Fachgebiet Biosystemtechnik  
Albrecht-Thaer-Weg 3  
14195 Berlin
- Bearbeitung: Dr. Nazim Gruda, BSc Sandra Gottschalk, Sabine  
Weidemann, Sebastian Kittel, Prof. Dr. Uwe Schmidt

Berlin, November 2009

Die Förderung des Vorhabens erfolgte aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE).

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1</b>	<b>Problemstellung.....</b>	<b>7</b>
1.1.1	Geothermie.....	8
1.1.2	Pflanzenmaterial der Versuchsreihe.....	11
1.1.2.1	<i>Euphorbia pulcherrima</i> .....	11
1.1.2.2	<i>Pelargonium zonale</i> .....	13
<b>1.2</b>	<b>Zielstellung und Vorgehensweise.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>Material und Methoden.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Versuchsaufbau.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Temperaturführung.....</b>	<b>15</b>
2.2.1	<i>Euphorbia pulcherrima</i> .....	15
2.2.2	<i>Pelargonium zonale</i> .....	16
<b>2.3</b>	<b>Pflanzenmaterial.....</b>	<b>17</b>
<b>2.4</b>	<b>Kulturmaßnahmen und Kulturführung.....</b>	<b>18</b>
2.4.1	Düngung.....	18
2.4.2	Bewässerung.....	19
2.4.3	Pflanzenschutzmaßnahmen.....	20
<b>2.5</b>	<b>Erfassung pflanzenbaulicher Merkmale.....</b>	<b>20</b>
2.5.1	Zwischenbonituren während der Versuchsperiode.....	20
2.5.1.1	Schattenflächenmessung.....	20
2.5.1.2	Ermittlung der Blütenanzahl während der Versuchsperiode.....	21
2.5.2	Endbonitur.....	21
<b>2.6</b>	<b>Automatische Erfassung von Messdaten.....</b>	<b>22</b>
<b>2.7</b>	<b>Datenverarbeitung.....</b>	<b>24</b>
<b>2.8</b>	<b>Statistische Analyse.....</b>	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Ergebnisse <i>Euphorbia pulcherrima</i>.....</b>	<b>26</b>
3.1.1	Klima und Phytomonitoring.....	26
3.1.2	Vegetatives Wachstum von <i>Euphorbia pulcherrima</i> anhand der Blattflächenprojektion.....	28
3.1.3	Vegetatives Wachstum von <i>Euphorbia pulcherrima</i> Endbonitur.....	29

3.1.4	Generative Entwicklung von <i>Euphorbia pulcherrima</i> .....	30
<b>3.2</b>	<b>Ergebnisse <i>Pelargonium zonale</i></b> .....	<b>31</b>
3.2.1	Klima.....	31
3.2.2	Phytomonitoring.....	34
3.2.2.1	Photosyntheserate .....	34
3.2.2.2	Transpiration .....	35
3.2.3	Vegetatives Wachstum von <i>Pelargonium zonale</i> anhand der Blattflächenprojektion .....	36
3.2.4	Vegetatives Wachstum anhand der Endbonitur .....	41
3.2.5	Generative Entwicklung von <i>Pelargonium zonale</i> .....	43
<b>4</b>	<b><i>Diskussion</i></b> .....	<b>46</b>
<b>4.1</b>	<b>Diskussion <i>Euphorbia pulcherrima</i></b> .....	<b>46</b>
4.1.1	Klimaführung .....	46
4.1.2	Wachstum und vegetative Entwicklung.....	46
4.1.3	Blühverhalten.....	49
<b>4.2</b>	<b>Diskussion <i>Pelargonium zonale</i></b> .....	<b>51</b>
4.2.1	Klimadaten .....	51
4.2.2	Phytomonitoring.....	51
4.2.3	Pflanzenwachstum.....	51
4.2.4	vegetative Pflanzenparameter .....	52
4.2.4.1	generative Pflanzenparameter .....	52
4.2.5	Vergleich mit <i>Euphorbia pulcherrima</i> .....	54
<b>5</b>	<b><i>Zusammenfassung</i></b> .....	<b>55</b>
<b>6</b>	<b><i>Danksagung</i></b> .....	<b>57</b>
<b>7</b>	<b><i>Literatur</i></b> .....	<b>58</b>
<b>8</b>	<b><i>Eigene Veröffentlichungen zum Thema</i></b> .....	<b>61</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema der Erdwärmenutzung in Neustadt-Glewe. ....	10
Abbildung 2: Poinsettienpflanze nach dem Stutzen auf fünf Blätter.....	18
Abbildung 3: Phytomonitoringsystem mit Robosensor an <i>Euphorbia pulcherrima</i> Willd. ex Klotzsch und Datengewinnung.....	24
Abbildung 4: Mittelwerte der Tages- bzw. Nachttemperaturen von KW 37 bis 51..	26
Abbildung 5: Photosyntheserate der Luxuswärmekabine und der Referenzkabine von <i>Euphorbia pulcherrima</i> in Abhängigkeit von der Strahlung (PAR). ....	27
Abbildung 6: Verlauf des Schattenflächenzuwachses (gestrichelt) und der Schattenfläche(durchgezogen) bei <i>Euphorbia pulcherrima</i> . ....	28
Abbildung 7: Trauermückenschäden mit symptomatischen Welkeerscheinungen an den Seitentrieben. ....	29
Abbildung 8: <i>Euphorbia pulcherrima</i> der Luxuswärmekabine. Im Hintergrund sind noch nicht gefärbte Pflanzen der Referenzkabine zu sehen. ....	30
Abbildung 9: Dampfdruckdifferenz der Referenzkabine und Luxuswärmekabine in der 9. bis 16. Kalenderwoche. ....	32
Abbildung 10: Dampfdruckdifferenz der Referenzkabine und Luxuswärmekabine in der 16. bis 20. Kalenderwoche. ....	32
Abbildung 11: Photosyntheserate (Mittelwerte und Maximalwerte) und PAR- Strahlung der 11. bis 16. Kalenderwoche der Luxuswärmekabine (LW) und Referenzkabine (Ref). ....	35
Abbildung 12: Dreidimensionale Darstellung der Photosynthesewerte in Abhängigkeit von der Temperatur (°C) und der relativen Feuchte (%) der Luxuswärmekabine und Referenzkabine mit den Zonen der maximalen Photosyntheseleistungen ....	35
Abbildung 13:Transpirationsrate und PAR-Strahlung der 11. bis 16. Kalenderwoche der Luxuswärmekabine (LW) und Referenzkabine (Ref).....	36
Abbildung 14: Schattenbildflächen und Schattenbildflächenzuwachs (%) der Luxuswärmekabine (LW) und der Referenzkabine (Ref) in der 8. bis 16. Kalenderwoche der Sorte 'Anthony'.....	38
Abbildung 15: Schattenbildflächen und Schattenbildflächenzuwachs (%) der Luxuswärmekabine (LW) und der Referenzkabine (Ref) in der 8. bis 16. Kalenderwoche der Sorte 'Candy Rose'.....	38
Abbildung 16: Schattenbildfläche und Schattenflächenzuwachs (%) der Luxuswärmekabine (LW) und Referenzkabine (Ref) in der 8. bis 16. Kalenderwoche der Sorte 'Sassa'.....	39

Abbildung 17: Schattenbildfläche und Schattenflächenzuwachs (%) der Luxuswärmekabine (LW) und der Referenzkabine (Ref) in der 16. bis 20. KW der Sorte 'Emilia'.....	40
Abbildung 18: Schattenbildfläche und Schattenflächenzuwachs (%) in der 16. bis 20. Kalenderwoche der Sorte 'Shocking Pink'.....	40
<b>Abbildung 19:</b> Die entfernten Blütenstände von der 10. bis zur 14. Kalenderwoche der Luxuswärmekabine (LW) von den Sorten 'Anthony', 'Candy Rose' und 'Sassa'.....	44
Abbildung 20: Die entfernten Blütenstände von der 10. bis zur 14. Kalenderwoche und der Referenzkabine (Ref) von den Sorten 'Anthony', 'Candy Rose' und 'Sassa'.....	44
Abbildung 21: Zuwachsraten der Bestände im Verhältnis zur Lichtmenge. ....	48
Abbildung 22: Photosyntheserate von <i>Euphorbia pulcherrima</i> .....	49

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausprägung der bonitierten Merkmale ( $H_0$ für T-Test: Referenzkabine = Luxuswärmekabine.) .....	30
Tabelle 2: Klimaparameter von <i>Pelargonium zonale</i> .....	33
Tabelle 3: Pflanzenbauliche Parameter (vegetativ) der Sorten 'Anthony', 'Candy Rose' und 'Sassa'. (x= nicht signifikant, - = signifikant) .....	42
Tabelle 4: Pflanzenbauliche Parameter (vegetativ) der Sorten 'Emilia' und 'Shocking Pink'. .....	43
Tabelle 5: Pflanzenbauliche Parameter (generativ) von 'Anthony', 'Candy Rose' und 'Sassa'. .....	45
Tabelle 6: Pflanzenbauliche Parameter (generativ) von 'Emilia' und 'Shocking Pink'. .....	45

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Die dramatisch zugespitzte Preissituation im Energiesektor, speziell bei den fossilen Brennstoffen, bedroht vornehmlich die Gewächshausproduktion. Besonders die Existenz kleiner und mittlerer Gartenbaubetriebe ist derzeit ernsthaft gefährdet. Neben der Kostenproblematik besteht infolge der internationalen Verpflichtung zur Absenkung der CO<sub>2</sub> Emissionen die Notwendigkeit auch aufgrund ökologischer, politischer und gesellschaftlicher Erfordernisse über Alternativen der Wärmeerzeugung und Wärmenutzung nachzudenken (Ruhm et al. 2007).

Das Potential erneuerbarer Energie im Bereich der Geothermie ist unerschöpflich und dementsprechend hoch sind die Erwartungen. Deutschlandweit sind ca. 150 Geothermie-Anlagen mit einer Investitionssumme von geschätzten vier Milliarden Euro in Vorbereitung. Wie bei fast keiner anderen neuen Energiequelle gibt es eine so große Übereinstimmung zwischen den Zielen des Umweltschutzes und der Energienutzung. Im deutschen Gartenbau ist der Betrieb Baumgärtner am Standort Neustadt-Glewe in MV ein Vorreiter dieser Anwendung. Erste Einsätze zeigen, dass hochwertige Zierpflanzen CO<sub>2</sub>-neutral ganzjährig produziert werden können. Die Energie dafür wird bereitgestellt aus dem Rücklauf des Wärmenetzes eines Erdwärmekraftwerkes. Bei der Anwendung von Geothermiewärme zur Beheizung von Gewächshäusern kann sich eine Situation ergeben, die dem Problem der Nutzung von Abwärme aus Industrieanlagen (Biogasanlagen) gleicht. Der Gärtnereibetrieb steht in der Energieversorgungskette weit hinten. Das führt zu einer Nutzung von Heizwärme mit niedrigem Exergiegehalt (Temperaturniveau).

Hierfür müssen Techniken eingesetzt werden, mit denen Niedertemperaturwärme effizient freigesetzt und an die Pflanzen übertragen werden kann. Zum Einsatz kommen dabei überwiegend großflächige Strahlungsheizungen (Betonbodenheizung), Substrat- oder Gebläseheizungen. Gegenüber der traditionellen Rohr- oder Konvektionsheizung mit einer Oberflächentemperatur von ca. 70 °C muss Niedertemperaturwärme mit anderen Kulturführungsmaßnahmen - vor allem mit alternativen Steuerungsalgorithmen betrieben werden.

Diese Problemstellung liegt auch dem Projekt „Geothermiewärme Neustadt-Glewe“ zugrunde. Deshalb soll hier folgende Strategie verfolgt werden: Um den geothermischen Prozess nicht negativ zu beeinflussen, soll neben einer maximalen Heizvorlauftemperatur von 50 °C die Rücklauftemperatur 35 °C nicht unterschreiten. Andererseits steht preisgünstig Wärme im Tagesverlauf in Zeiten zur Verfügung, in denen konventionell geführte Gewächshausanlagen wenig oder nicht beheizt werden müssen. Damit kann eine „Luxus-Wärmeversorgung der Kulturen“ erfolgen. Bisherige Arbeiten fokussieren auf eine Absenkung des Energiebedarfs um den Einsatz fossiler Brennstoffe zu verringern und Emissionen zu vermeiden. Die Verfügbarkeit von preiswerter und CO<sub>2</sub>-neutraler Wärme mit niedrigem Exergiegehalt wirft jedoch neue Fragen der Kulturführung auf, die untersucht werden sollen. Insbesondere die Kulturvorteile durch Luxus-Wärmeversorgung in Bezug auf Qualität und Kulturdauer spielen eine wesentliche Rolle.

### 1.1.1 Geothermie

Unter dem Begriff Geothermie werden Ansätze zur Nutzung von Erdwärme subsumiert. Dabei wird sich zu Nutze gemacht, dass die Temperatur zum Erdinneren hin zunimmt. Das Erdwärmepotenzial wird, vergleichbar mit der Sonnenergie, als sehr hoch eingeschätzt, wobei auch von einem sehr hohen Nutzungsaufwand auszugehen ist (Ruhm et al. 2007):

Um Thermalwasser mit einem wirtschaftlich interessanten Temperaturniveau (>40 °C) anzutreffen, sind in Deutschland überwiegend Bohrtiefen von mindestens etwa 1000 m notwendig (Erbas et al. 1999).

#### ***Heizwerk Neustadt-Glewe***

Die erste Bohrung in Neustadt-Glewe wurde im Jahre 1988 in 2455 m Tiefe niedergebracht. Man fand dort fast 100°C heißes salzhaltiges Thermalwasser in einer gut durchlässigen Sandschicht. Ein Jahr später (1989) wurde in 1,5 Kilometer Entfernung eine zweite Bohrung bis auf 2335 m Tiefe vorgenommen. Diese zweite Bohrung war erforderlich, um das salzhaltige Wasser wieder in die Tiefe zu leiten. Es konnte aufgrund des hohen Salzgehaltes (227g/l - zum Vergleich: Ozeanwasser enthält nur 35g/l) und zum Erhalt des unterirdischen Wasserspiegels nicht einfach in die oberirdischen Gewässer geleitet werden ([www.erdwaerme-kraft.de](http://www.erdwaerme-kraft.de)).

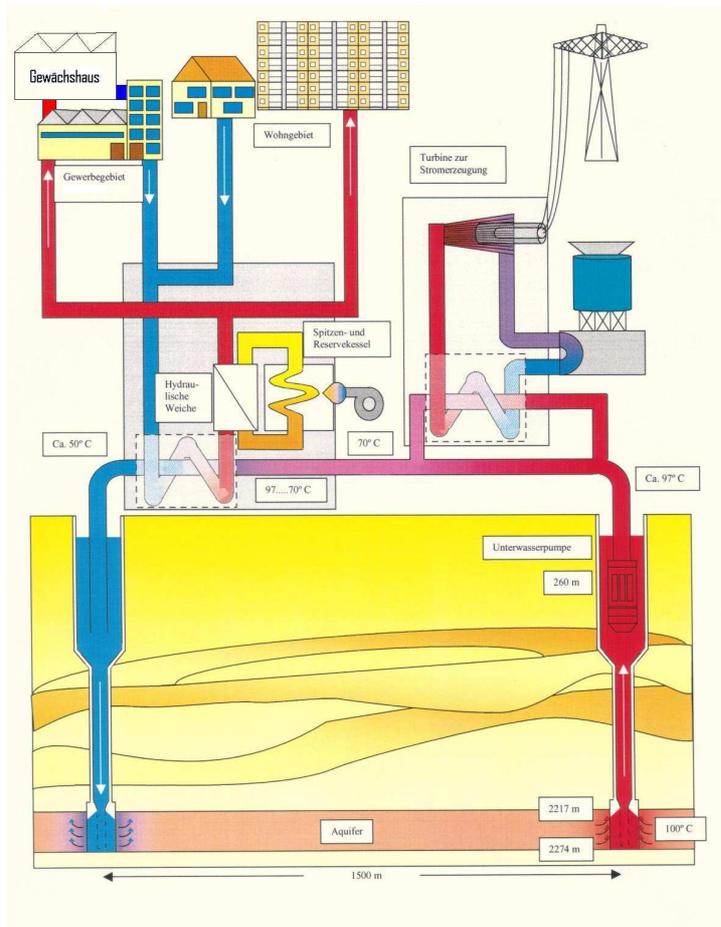
---

Im Zuge der deutschen Einheit wurden dann die weiteren Planungen zunächst hinfällig, insbesondere durch das Wegbrechen des Lederkombinates als wichtigsten Energieabnehmer.

### *Erdwärme-Kraftwerk*

Schon frühzeitig arbeitete man an der Lösung, aus der überschüssigen Erdwärme während des Sommers Strom zu gewinnen. Erst als das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) am 29.03.2000 erweitert wurde, konnten die lange vorbereiteten Pläne zur Stromerzeugung umgesetzt werden. Nur so konnten die hohen Kosten des komplizierten Anlagenbaus wirtschaftlich getragen werden und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit stellte Fördermittel bereit.

Das neue Versorgungskonzept sieht für das Kraftwerk vor, im Sommer mit voller Leistung Strom zu produzieren. Erst bei niedrigen Außentemperaturen wird die Stromgewinnung ausgeschaltet, weil dann die gesamte Erdwärme zur Wärmeversorgung benötigt wird. Die geothermische Anlage Neustadt-Glewe ist heute somit eine Kraft-Wärme-Koppelungsanlage, also eine kombinierte Strom- und Wärmeversorgung (Abbildung 1). Weitere Angaben über die elektrische Leistung usw. sind der Website der Betreiber zu entnehmen: [www.erdwaerme-kraft.de](http://www.erdwaerme-kraft.de).



**Abbildung 1:** Schema der Erdwärmennutzung in Neustadt-Glewe.

### 1.1.2 Pflanzenmaterial der Versuchsreihe

Für den Zierpflanzenproduzenten ist es von enormer Bedeutung, wenn er zuverlässig den Punkt der Marktreife seiner Pflanzen bestimmen kann, um gezielte Vermarktung zu betreiben, Energie und Raum besser auszunutzen und somit seine Gewinne zu maximieren.

#### 1.1.2.1 *Euphorbia pulcherrima*

Der Weihnachtsstern (*Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch), auch als Adventsstern, Christstern oder Poinsettie bekannt, ist eine Pflanzenart aus der Gattung *Euphorbia* in der Familie der *Euphorbiaceae* (Wolfsmilchgewächse). Weihnachtssterne sind aufgrund der auffälligen, intensiv gefärbten Brakteen, die sternförmig angeordnet sind, sehr begehrte Zimmerpflanzen vor allem in der Advents- und Weihnachtszeit. Sie gehören zu den wichtigsten Topfpflanzen Deutschlands.

Die Poinsettie, ein immergrüner Strauch, ist eine Kurztagpflanze. Bei einer Dunkelphase von mindestens 12 Stunden bildet sie auffällig gefärbte Brakteen (Hochblätter) aus, welche Insekten anlocken sollen, um die gelb-grünen Cyathien (Blüten) zu bestäuben, die sich in der Mitte der Brakteen befinden. Die überwiegend rote oder rosa Ausfärbung der Brakteen wird durch Cyanidin- bzw. Pelargonidin-Glucoside hervorgerufen. Unter natürlichen Bedingungen erfolgt die Blüteninduktion in Mitteleuropa zwischen Ende September und Anfang Oktober (Horn 1996).

Der Weihnachtsstern stammt ursprünglich aus den tropischen Gebieten Mittel- und Südamerikas, vor allem aus Mexiko, Venezuela und Brasilien. Von dort aus verbreitete er sich rund um den Äquator. 1804 wurde er von Alexander von Humboldt zum ersten Mal beschrieben und gelangte 1828 durch Joel Robert Poinsett nach Nordamerika. In Deutschland wurde der Weihnachtsstern 1902 in Kultur genommen. Anfang des 20. Jahrhunderts begann auch die züchterische Entwicklung mit Fokus auf die Schnittblumenproduktion in den USA ( Kalifornien ) (Wyss 2001). Die europäische Züchtung findet sich vor allem in Frankreich, Norwegen und Deutschland. Aus den USA und Norwegen wurden 1962 die ersten gut haltbaren Topfpflanzensorten eingeführt (Horn 1996)

*Euphorbia pulcherrima* hat einen relativ kleinen Angebotszeitraum, jedoch bei guten Verkaufszahlen einen großen Anteil am Jahresgewinn. Gerade deshalb müssen die optimale Kulturführung und der Zeitpunkt der idealen Brakteenfärbung bekannt sein. Die Parameter Temperatur, Lichtintensität, Nährstoff- und Wassermenge sowie der Einsatz von Wachstumsregulatoren sind dabei entscheidend (Horn 1996).

#### **1.1.2.1.1 Marktvolumen**

Der *E. pulcherrima* Verkauf der verschiedensten Farben und Sorten erzielte 2007 einen Umsatz von 105 Millionen Euro, welches einem Marktvolumen von fast 10 % entspricht. Im Vergleich dazu beträgt der Marktwert des Weihnachtssterns 1997 in den USA (Ming Lee 2000) 325 Millionen US\$. Innerhalb Europas ist Deutschland der größte Produzent von Weihnachtssternen. Hauptanbauggebiete sind Nordrhein-Westfalen (30 %), Bayern (17 %) und Niedersachsen (17 %). Die Produktion stieg in den letzten Jahren (2000) von 26,6 Millionen Stück auf (2007) 29 Millionen. Insgesamt beläuft sich die Verkaufszahl auf ca. 36 Millionen Pflanzen. Der Hauptimportbedarf wird über die Niederlande abgedeckt. Auf der Verkaufsliste belegt der Weihnachtsstern den zweiten Platz und das innerhalb von zwei Angebotsmonaten (Niehues 2008).

Die Pflanzen werden so kultiviert, dass sie Anfang November bis Mitte Dezember verkauft werden können. Weihnachtssterne gibt es in Form von Minis, Midis, Hochstamm, Pyramide und Ampel zu kaufen. Besonders beliebt sind vor allem Mehrtrieber mit 3-6 Trieben. Sie werden als hell- oder dunkellaubige Sorten mit vorwiegend roten, rosa, rosa-weiß oder weiß gefärbten Hochblättern angeboten. Auch in anderen europäischen Ländern hat der Verkauf von Weihnachtssternen erhebliche wirtschaftliche Bedeutung (Horn 1996).

#### **1.1.2.1.2 Allgemeine Kulturführung**

Zwischen 14 und 26 °C nimmt das Wachstum von *E. pulcherrima* mit steigender Temperatur zu und unter 14 °C wird es eingestellt. In der Praxis hat sich für die Kultur von Mehrtriebern, eine Mitteltemperatur von 20 °C für die Zeit vom Topfen (Kalenderwoche 34) bis Ende Oktober (für eine sichere Umstimmung der Apikalmeristeme auf die reproduktive Phase) bewährt. Direkt nach dem Anwurzeln,

in Woche 36, erfolgt das Stutzen um die Verzweigung einzuleiten. Als Folge entsteht eine Kulturverlängerung von circa einem Monat. Anschließende Behandlung (ab Kalenderwoche 43) mit durchschnittlich 22 °C, führt zur Vergrößerung der Brakteen. Bei starkwüchsigen Sorten werden noch mehrere Hemmstoffbehandlungen notwendig, die durch eine Klimaführung mit „Cool-Morning“ verringert werden können (Horn 1996).

### **1.1.2.2 *Pelargonium zonale***

Da Pelargonien zu den beliebtesten Zierpflanzen gehören, stellt ihre Produktion einen wichtigen Bereich bei Zierpflanzenproduzenten dar. Im Jahr 2007 wurden etwa 160 bis 180 Millionen Pelargonien verkauft, davon wurden 120 Millionen Pflanzen in Deutschland produziert (Niehues, R., 2008). Im Vergleich dazu wurden im selben Jahr 24 Millionen Cyclamen und 18 Millionen Azaleen produziert. Pelargonien gibt es in vielen Farben und in vielen verschiedenen Sorten in stehender Variante (*Pelargonium zonale*) oder hängend (*Pelargonium peltatum*). Sie werden nicht nur als Zierpflanzen geschätzt, sondern finden auch Verwendung als Grundstoff für Arzneimittel, zum Verfeinern von Speisen und als Bestandteil von Duftölen (Hanselmann, 2008).

In der Praxis beginnt die Kulturzeit Mitte Januar bis Anfang März, um verkaufsfähige Ware zu Ende April bis Mitte Mai zu produzieren. Nach dem Topfen ist die Idealtemperatur zum Anwachsen der Pflanzen 18 °C. Während der Kulturdauer bis zum Verkauf ist die Tagesmitteltemperatur bei 16 °C. Nach vier Wochen findet bei einigen Sorten ein Entspitzen statt, um die Verzweigung zu fördern. Hemmstoffbehandlungen werden bei stark wachsenden Sorten ein- bis zweimal durchgeführt.

Ein wichtiges Segment des Zierpflanzenbaus sind Beet- und Balkonpflanzen, mit denen etwa 40 % des Jahresumsatzes erzielt werden. Der Hauptabsatzzeitraum von Beet- und Balkonpflanzen hat sich in den letzten Jahren von etwa Mitte Mai auf März bis April verfrüht (Hendriks, 1993). Sollten höhere Frühjahrstemperaturen zu einer weiteren Verfrühtung des Angebotszeitraums führen, wäre es erforderlich, die Produktion in der besonders lichtarmen Jahreszeit zu beginnen. Es ist nicht auszuschließen, dass eine Temperaturerhöhung dadurch zu einem insgesamt höheren Energieaufwand für die Produktion führen könnte (Hendriks, 1993). Dieser Effekt wurde bisher jedoch noch nicht quantifiziert.

## **1.2 Zielstellung und Vorgehensweise**

Über die Auswirkungen einer höheren Temperaturführung auf die Pflanzenqualität und den Vermarktungszeitpunkt liegen bisher noch wenige Untersuchungen vor. Es ergeben sich Änderungen in der Wärmeversorgung der Kulturen, die wiederum Auswirkungen auf die Qualität und den Ertrag haben können. Eine Beobachtung des Mikroklimas in Pflanzenbeständen unter Bedingungen strahlungsintensiver Heizungen und Luxus-Wärmeversorgung ist deshalb erforderlich. Mithilfe von Phytomonitoring-Systemen können Rückschlüsse auf mikroklimatische Veränderungen während der Wachstumsphase gezogen werden.

Ziel, der hier dargestellte Arbeit war es, den Einfluss einer „Luxus-Wärmeversorgung“ im Niedertemperaturbereich auf die Qualität von Zierpflanzen zu untersuchen und darzustellen. Ein weiteres Versuchsziel bestand darin, zu zeigen, ob eine „Luxus-Wärmeversorgung“ zur Verkürzung der Kulturdauer und damit zu einer Optimierung in der Produktion beitragen kann. Da zielgerichtete Versuche unter Produktionsbedingungen bestimmte Variationen nicht zulassen, wurden die Experimente im Rahmen des Unterauftrages an der Humboldt-Universität zu Berlin in zwei Kabinen des Forschungsgewächshauses in Berlin-Dahlem durchgeführt.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Versuchsaufbau

Um die Produktionsbedingungen im Betrieb Neustadt-Glewe nachbilden zu können, wurden Pflanztische am Boden auf Heizungsrohre gestellt, um damit die Betonbodenheizung im Produktionsgewächshaus zu simulieren. Über eine Anstauabewässerung konnten vergleichbare Bewässerungs- und Fertigungszyklen gefahren werden.

Im Versuch wurden die Pflanzen auf niedrigen Ebbe- und Flutischen, 5 cm über der Unter-Tisch-Heizung, kultiviert. Die Heizungsrohre hatten einen Abstand von 15 cm zum Boden. Ein Unterschied zur Fußbodenheizung bestand darin, dass die erwärmte Luft nicht direkt zwischen den Pflanzen (Töpfen) nach oben strömte, sondern in den Freiräumen zwischen den Kunststoffischen. Desweiteren ist die Wärmespeicherkapazität von Betonböden höher als von Kunststoffischen.

Zur physiologischen Untersuchung wurde ein Phytomonitoringsystem installiert, mit dem Pflanzensignale (Photosynthese, Transpiration und andere) erfasst und online ausgewertet wurden.

### 2.2 Temperaturführung

Zur Durchführung der Experimente standen zwei Kabinen mit jeweils 75 m<sup>2</sup> zur Verfügung. Um Auswirkungen einer Luxuswärmestrategie auf die Pflanzen zu untersuchen, wurden zwei verschiedene Temperaturstrategien in den Kabinen gefahren. In der Referenzkabine wurde die konventionelle Klimaführung realisiert, während in der anderen Kabine eine Luxuswärmeversorgung der Pflanzen stattfand. Die „Luxuswärmestrategie“ beinhaltete eine Klimaführung, welche sich innerhalb des Optimumbereiches der Pflanzen befand.

#### 2.2.1 *Euphorbia pulcherrima*

Die Kabinen wurden mit einer einheitlichen Klimaführung bezüglich des Pflanzenbestands geführt. Der einzige Unterschied bestand in der Einstellung der Lufttemperatur. Grundlage zur Beheizung der Weihnachtssterne war ein Programm mit einem Basisheizungssollwert von 18/16 °C (Tag/Nacht). Die Lufttemperatur lag für

eine Woche bei 20 °C (Tag/Nacht), um das Einwurzeln zu fördern. Am 10.09.09 wurde die Temperatur in den Gewächshäusern wie folgt differenziert:

### **Luxuswärmekabine**

In der Luxuswärmekabine wurde eine Luxuswärmestrategie von 25/16 °C (Tag/Nacht) installiert. Ergänzt wurde diese Klimaführung durch ein 'cool morning', um die Differenzen der Temperatursummen beider Kabinen zu reduzieren. Ziel war es kompakte Pflanzen mit nicht sehr langen Internodien zu erhalten. Für die 'cool morning'- Periode wurde in Anlehnung an Wartenberg (2006, 2007) der Heizungssollwert 2 h vor Sonnenaufgang für 4 h auf 14 °C abgesenkt. Am 09.09.2009 wurde die 'cool-morning'- Temperatur auf 12 °C angepasst. Eine Temperaturabsenkung über diese Werte hinaus wurde nicht veranlasst, um weitere stärkere Temperaturdifferenzen innerhalb der Kabinen zu vermeiden (Wartenberg 2006). Der Lüftungssollwert wurde 4 K höher auf 16 °C eingestellt. Die Temperatursumme in der Luxuswärmekabine betrug 484 °Ch. Nach der Anpassung der 'cool morning'- Temperatur war sie bei 470 °Ch.

### **Referenzkabine**

In der Referenzkabine blieb die Temperaturführung auf 18/16 °C (Tag/Nacht) eingestellt. In der konventionellen Kabine wurde eine Temperatursumme von ca. 415 °Ch erzielt. Um Energie zu sparen, waren nachts die Energieschirme geschlossen, während tagsüber die Schattierung bei einem Wert größer 70 klx zuging. Ab 44. Kalenderwoche wurde sie ausgeschaltet, da vor allem in der Luxuswärmekabine die 'cool morning' - Temperatur nicht für die gesamte Periode erreicht werden konnten.

#### **2.2.2 *Pelargonium zonale***

Um den systembedingten Einfluss der Lage und Ausstattung der Kabinen auszuschließen, wurden sie beim Anbau der *Pelargonium zonale* ausgetauscht: In der Referenzkabine der Poinsettien wurden somit Pflanzen der Luxuswaermevariante angebaut und *vice versa*. Auch bei diesen Versuchen, wurde in den Kabinen eine einheitliche Klimaführung bezüglich des Pflanzenbestands durchgeführt. Der einzige Unterschied bestand wiederum in der Einstellung der Lufttemperatur.

### **Luxuswärmekabine**

Die Luxuswärmestrategie beinhaltete eine Tagestemperatur von 20 °C und eine Nachttemperatur von 18 °C, ergänzt durch eine Cool-Morning-Periode. Dabei wurde die Lufttemperatur 2 h vor Sonnenaufgang für 4 h auf 14 °C herabgesetzt. Die Unter-Tisch-Heizung hatte einen kontinuierlichen Sollwert von 16 °C.

Am 03.03.2009 wurde die eingestellte Temperaturführung korrigiert. Um die Cool-Morning-Temperatur von 14 °C sicherzustellen, wurde die Unter-Tisch-Heizung während dieser Periode ganz ausgeschaltet. Die 24h-Temperatursumme betrug 436 °Ch.

### **Referenzkabine**

In der Referenzkabine wurden die Bedingungen der konventionellen Klimaführung zur Pelargonienproduktion hergestellt. Die Soll-Lufttemperatur am Tag war 16 °C und in der Nacht 14 °C. Die Unter-Tisch-Heizung wurde zunächst auf einen Sollwert von 16°C eingestellt. Nach der Anpassung am 03.03.2009 hatte dieser Sollwert eine Höhe von 14°C. Es wurde eine Temperatursumme von 360 °Ch erzielt.

Bei dem zweiten Versuch vom 15.04.2009 bis zum 19.05.2009 wurde die eingestellte Temperaturführung für beide Kabinen beibehalten.

## **2.3 Pflanzenmaterial**

Die Pflanzen für die Versuchsreihe wurden von der Gärtnerei Baumgärten (Neustadt-Glewe) zur Verfügung gestellt. Als Substrat diente ein Medium von Klasmann-Deilmann TS3 mit Ton (Rezeptur 607). Geliefert wurden die Pflanzen in Töpfen der Größe 12.

Für den Versuch mit *Euphorbia pulcherrima* wurde die Sorte „RED FOX Infinity Red“ gewählt. Sie zeichnet sich durch mittelstarke Wüchsigkeit und eine Reaktionszeit von 8 Wochen (Dümmler 2009) aus, was in etwa der Mitte des Sortenspektrums entspricht (Hell 2004). Das Topfen der Pflanzen erfolgte am 20.08.2008 in 12-er Töpfe. Sie wurden am 27.08.2008 in zwei unterschiedlichen Abteilungen der Gewächshäuser aufgestellt. Am 08.09.2009 wurden die Poinsettien auf 5 Blätter gestutzt, um die Seitentriebbildung zu fördern (

Abbildung 2). Danach wurden die Töpfe auf Ebbe-Flut-Tischen in einem Abstand von 25 x 20 cm verteilt. Am 20.10.2008 wurden die Pflanzen auf den Endabstand mit einer Dichte von 12 Pflanzen/ m<sup>2</sup> gerückt.

Am 30.10.2008 wurden die Wände der Gewächshauskabinen mit Vorhängen aus schwarzer Folie verdunkelt. Diese Maßnahme wurde ergriffen, um den Einfluss von Störlicht aus der Nachbarkabine zu reduzieren.

Die Pelargonien wurden im Jungpflanzenbetrieb Elsner pac® Jungpflanzen GbR als Stecklinge produziert und später in der Firma Baumgärtner Gartenbau in Töpfe der Größe 12 gepflanzt. Die Sorten 'Anthony', 'Candy Rose' und 'Sassa' wurden am 09.02.2009 im Gewächshaus in Berlin-Dahlem auf die Tische verteilt. Für den zweiten Versuch erfolgte die Aufstellung der Sorten 'Emilia' und 'Shocking Pink' am 15.04.2009.



**Abbildung 2:** Poinsettienpflanze nach dem Stutzen auf fünf Blätter.

## ***2.4 Kulturmaßnahmen und Kulturführung***

### **2.4.1 Düngung**

Als Düngung wurde Volldünger Ferty-3-Mega (18+12+18(+2)) (NPK(Mg)) mit Spurenelementen (Planta Düngemittel GmbH, 93123 Regenstauf) für die gesamte Versuchsreihe verwendet. Es standen zwei Sammelbehälter pro Kabine zur Verfügung. Jeweils zwei Ebbe/ Flut-Tische pro Kabine waren mit einem Behälter angeschlossen und der dritte Tisch mit dem zweiten Behälter. Die EC- und pH-Werte wurden zweimal pro Woche überprüft und bei Bedarf korrigiert, so dass eine

Gleichbehandlung der Pflanzen in beiden Kabinen gewährleistet war. Aus jedem Behälter wurde die Nährlösung auf den Tisch gepumpt und gelangte so an die Pflanzen. Überschüssige Nährlösung floss in die Sammelbehälter zurück.

Die *Euphorbia pulcherrima* wurden zum ersten Mal am 12.09.2008 mit Nährlösung versorgt (EC = 1,4 dS m<sup>-1</sup>, pH = ca. 5,7). Die Konzentration der Nährlösung wurde an das Pflanzenwachstum angepasst. So wurde, z.B. Ende Oktober die Konzentration der Nährlösung auf 1,7 dS m<sup>-1</sup> erhöht und der pH-Wert auf ca. 5,5 abgesenkt. Diese Maßnahme erwies sich als erfolgreich, um unerwünschten Erscheinungen wie punktuellen Blattaufhellungen der Pflanzen in der Referenzkabine entgegenzuwirken.

Bei *Pelargonium zonale* wurden der EC-Wert auf 1,3 und der pH-Wert auf 5,6 eingestellt. Diese Einstellung der Nährlösung wurde während des gesamten Versuchszeitraumes beibehalten.

#### 2.4.2 Bewässerung

Zum Beginn der Kultur wurden die Pflanzen einzeln und nach Bedarf von oben gegossen. Diese Maßnahme wurde aufgrund des sehr inhomogenen Feuchtigkeitszustandes des Substrates durchgeführt.

Anschließend wurden die Pflanzen durch die Ebbe-Flut-Bewässerung mit Wasser und Nährstoffen versorgt. Der Flutvorgang erstreckte sich über ca. 20 Minuten, während das Wasser für 3-4 Minuten auf den Ebbe-Flut-Tischen stehen blieb und ca. 7 Minuten abließ.

Ab Kalenderwoche 37 fand bei *Euphorbia pulcherrima* eine Versorgung der Pflanzen mit Nährlösung (siehe 2.4.1) statt. In beiden Kabinen lag die Ebbe-Flut-Bewässerung zugrunde, angepasst an Pflanzenwachstum und -entwicklung. Zuerst wurde ein Mal pro Woche mit Nährlösung angestaut. Zum Kulturende, ab Kalenderwoche 45 fand zwei Mal pro Woche eine Bewässerung durch das Anstauverfahren mit Nährlösung statt.

Auch bei *Pelargonium zonale* wurde zum Versuchsbeginn einmal pro Woche bewässert. Ab 27.03.2009 wurde aufgrund der größeren Pflanzen, der höheren Außentemperaturen und der höheren Einstrahlung die Ebbe-Flut-Bewässerung zweimal pro Woche durchgeführt.

### 2.4.3 Pflanzenschutzmaßnahmen

Eine Behandlung der Pflanzen mit Cycocel 720 (0,2 %) fand zur Bremsung des Internodienwachstums statt. Bei *Euphorbia pulcherrima* wurde sie am 19.09.2008 durchgeführt. Die Pflanzen des ersten Versuches von *Pelargonium zonale* wurden zweimal behandelt, wodurch es an einigen Pflanzen zu Blattschäden in Form einer Gelbfärbung kam. Während der Durchführung des zweiten Versuchs mit *Pelargonium zonale* war eine Cycocel-Behandlung nicht notwendig.

Nach dem Stutzen der *Euphorbia pulcherrima* wurden die Pflanzen mit *Steinernema feltiae* von Fa. SAUTTER & STEPPER, 72119 Ammerbuch gegen Trauermücken behandelt. Laut der Produktbeschreibung dringen die ca. 0,8 mm großen Nematoden der Art *Steinernema* durch Körperöffnungen ein und geben ein Bakterium ab, das die Larve zersetzt. Tote Larven lösen sich rasch auf und können deshalb schlecht wieder gefunden werden (Sautter und Stepper 2008). Das Ausbringungsverfahren fand manuell durch das Gießen mittels eines Messglases direkt in den Topf statt. Am 25.09.2008 wurden die Pflanzen mit Conserv 0,2% gegen Weiße Fliege und Thripse gespritzt.

## 2.5 Erfassung pflanzenbaulicher Merkmale

### 2.5.1 Zwischenbonituren während der Versuchsperiode

#### 2.5.1.1 Schattenflächenmessung

Während der Vegetationszeit wurden in regelmäßigen Zeitintervallen Zwischenbonituren durchgeführt. An diesen Tagen wurde der pflanzenbauliche Parameter Blattflächenprojektion bzw. Grundfläche, auch Schattenbild genannt, der Pflanzen mit Hilfe einer Kamera aufgenommen. Zur Grundflächenbestimmung wurden die Pflanzen auf einen Tisch gestellt und die beschattete Fläche erfasst. Das Bildaufnahmegerät wurde in ein Stativ gebracht und die Höhe einmal der Pflanzengröße angepasst. Die Tischfläche, auf welche die Pflanzen aufgestellt wurden, war vorher mit einem schwarzen Band umrahmt, vermessen und kalibriert worden. Auf der Basis von Regressionsanalysen wurden die Kalibrierparameter festgelegt und in ein eigens dafür entwickeltes Softwareprogramm eingegeben. Dadurch war es möglich automatisch jedes Schattenbild einzelner Pflanzen nacheinander zu scannen und die Projektionsfläche (cm<sup>2</sup>) zu erfassen.

Bei *Euphorbia pulcherrima* wurde die Schattenflächenmessung ab dem 6.10.2008 zweimal pro Woche durchgeführt. Dafür wurden jeweils dieselben 10 markierten Pflanzen pro Kabine entnommen und fotografiert.

Während der Kulturdauer der Pelargonium zonale wurden einmal pro Woche Zwischenbonituren durchgeführt. An diesen Tagen wurden die Schattenbilder von 7 Pflanzen pro Sorte pro Tisch (insgesamt von 126 Pflanzen) aufgenommen.

### **2.5.1.2 Ermittlung der Blütenanzahl während der Versuchsperiode**

Bei Pelargonium zonale Sorten 'Anthony', 'Candy Rose' und 'Sassa' wurde während des ersten Versuchszeitraumes (vom 05.03.2009 bis zum 03.04.2009) wöchentlich die Anzahl der Blüten ermittelt. Um eine bestimmte Versuchsdauer sicher zu stellen, wurden diese Blütenstände entfernt. Die Pflanzen konnten so ihr vegetatives Wachstum fortsetzen. Die Bildung von Blatt- und Stängelmasse war damit uneingeschränkt möglich. Es sollte eine gute verkaufsfähige Ware mit einem entsprechenden Habitus produziert werden.

### **2.5.2 Endbonitur**

Es wurden bei der Endbonitur mit Hilfe nichtzerstörender Maßnahmen die Pflanzenparameter Anzahl von Blättern, Blüten bzw. Brakteen und Seitentrieben ermittelt. Ferner wurde die Frischmasse und Trockenmasse der vegetativen und generativen Pflanzenmerkmale nach Zerlegen der Pflanzen erfasst. Die Blattfläche und die Pflanzenhöhe wurden gemessen.

*Pflanzenhöhe (PH)*: Es wurde die Höhe von der Substratoberfläche bis zum Vegetationspunkt sowie die Gesamthöhe der Pflanze einschließlich der gemessen.

Die Anzahl der Seitentriebe, Anzahl der Blüten und Knospen bzw. Brakteen und die Anzahl der Blätter mit einer Mindestgröße von 2 cm wurden gezählt.

*Frischmasse (FM)*: Das Gewicht der Frischmasse von Stängeln, Blättern und bei Pelargonium zonale zusätzlich von den Blüten und Knospen wurde einzeln mit einer Präzisionswaage (Genauigkeit:1/100 g) ermittelt.

*Trockenmasse (TM)*: Nachdem die Blätter, Blüten/ Knospen und Stängel für drei Tage im Trockenschrank bei 60 °C, 80 °C und 105 °C (jeweils für 24 h) trockneten, wurde die Trockenmasse einzeln ausgewogen.

*Blattfläche (BF)*: die Blätter mit einer Mindestgröße von 2 cm wurden je Pflanze mittels Blattflächenmessgerät (Li-3100 von Fa. Licor) vermessen.

*Blattflächenindex (LAI)*: der Blattflächenindex wurde berechnet aus der Blattfläche in cm<sup>2</sup> und der Grundfläche, welche der Pflanze während der Kulturdauer zur Verfügung stand (Blattfläche / Grundfläche).

Eine abschließende Bonitur wurde bei *Euphorbia pulcherrima* am 22.12.2008 durchgeführt. Dafür wurden aus beiden Kabinen je 30 Pflanzen entnommen.

Die Endbonitur der *Pelargonium zonale* wurde am 20.04.2009 für den ersten Versuch und am 19.05.2009 für den zweiten Versuch durchgeführt. Dafür wurden Pflanzenparameter von 10 Pflanzen pro Tisch und Sorte (insgesamt 180 Pflanzen) gemessen. Zusätzlich zu den oben genannten Parametern wurde der *Growth Index (GI) berechnet*. Die Messungen der Pflanzenhöhe sowie der Durchmesser (2 Mal um 90 ° versetzt) wurden zur Berechnung des Growth Index benutzt ( $GI = a + b + c / 3$ ) wobei a = Pflanzenhöhe, b = Durchmesser 1 und c = Durchmesser 2 sind. Bei der Berechnung des *Growth Index 1 (GI 1)* wurde die Pflanzenhöhe bis zum Vegetationspunkt berücksichtigt. Die Berechnung des *Growth Index 2 (GI 2)* wurde anhand der Pflanzenhöhe inklusive der Blüte durchgeführt (Gruda et al. 2009).

## **2.6 Automatische Erfassung von Messdaten**

Folgende Daten wurden während der Versuchszeiträume bei *Euphorbium pulcherrima* und *Pelargonium zonale* erfasst:

### **Klimadaten im Gewächshaus**

- Temperatur (°C)
- Relative Luftfeuchte (%)
- CO<sub>2</sub>-Konzentration (ppm)
- Lichtintensität (klx)
- Globalstrahlung (W/m<sup>2</sup>)
- PAR-Strahlung (μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)

### **Phytometrische Messdaten**

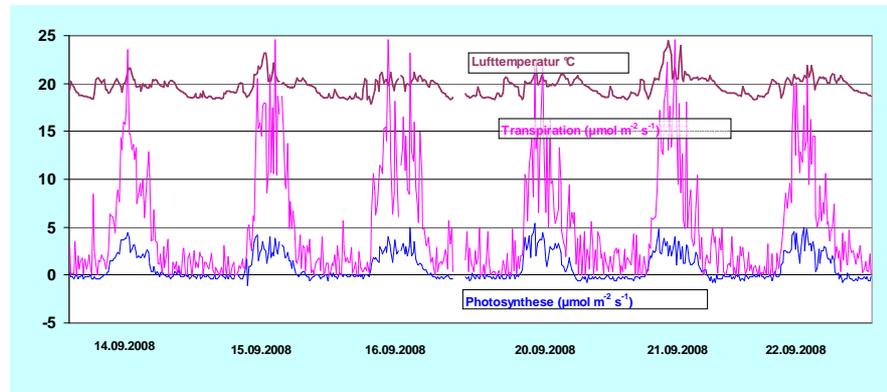
- CO<sub>2</sub>-Gaswechsel (μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)
- Photosyntheserate
- Blatttranspiration

Die phytometrischen Messdaten wurden mithilfe des PTM-48M Phytomonitors der Fa. Phyttec – Israel, aufgezeichnet. Der PTM-48M Monitor ist das derzeitige einzige kommerziell verfügbare System für automatische Langzeitmessungen des physiologischen Zustandes intakter Pflanzen. Das System ist mit vier selbstschließenden Blattküvetten (Abbildung 3) ausgestattet. Sie sind normalerweise geöffnet, die Blätter sind durch dünne Nylonfäden so fixiert, dass beim Schließen der Blattküvetten diese mit Blattfläche ausgefüllt sind. Für die Gaswechselformung des Blattes schließt sich die Küvette für 30 Sekunden. Diese Blattküvetten sind mehr als 90% der Zeit geöffnet, sodass keine Störungen (beispielsweise durch Kondensation in der Küvette) entstehen können. Die Standardküvetten haben eine Messfläche von 20 cm<sup>2</sup>. Zusätzlich befinden sich im Meßsystem Sensoren für das Messen der Solarstrahlung (Pyranometer), Lufttemperatur und Luftfeuchte. Der Monitor nimmt automatisch alle Daten auf, die zur Kalkulation des Gaswechsels benötigt werden. Innerhalb der Küvette werden beispielsweise die CO<sub>2</sub>-Konzentration und die Luftflussrate aufgezeichnet. Im Gegensatz dazu wird u. a. der Luftdruck und Lufttemperatur außerhalb der Küvette gemessen. Die Daten werden automatisch im Messgerät verarbeitet und aufgezeichnet. Die Gaswechselrate wird ausgegeben und gespeichert in  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , die Transpiration in  $\text{mg H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Mit Hilfe der erfassten Daten können weitere Bewertungsgrößen, wie Lichtnutzungseffizienz errechnet werden.

Dieses System ermöglicht eine direkte Bewertung des Gaswechsels, d.h. wie sich die Umweltfaktoren auf die Nettphotosynthese und die Respiration auswirken (TON et al. 2008). Die Vorteile laut TON et al. (2004) sind die ununterbrochene langfristige Überwachung verschiedener Parameter. Solche Kontrollen visualisieren Fluktuationen durch Transpiration und Turgor.

Der Messzyklus startet mit dem Spülen des Systems. Dieser Vorgang dauert 120 Sekunden. Hierbei sind alle Küvetten im offenen Zustand und werden durchströmt. Anschließend folgt ein Referenzabschnitt, nur die Küvette eins steht mit dem Messsystem in Verbindung. Dieser Abschnitt ist beendet, wenn ein steady-state-Zustand erreicht wird. Die erste Referenz stoppt nach 60 Sekunden. In diesem Moment schließt sich die Küvette eins und beginnt mit den Messungen. Dieser Vorgang dauert 30 Sekunden. Nachfolgend wiederholen sich diese Vorgänge (Referenzabschnitt und Messkreislauf) bei der zweiten, dritten und vierten Küvette. Die typische Dauer des Kreislaufes der vier Küvetten beträgt etwa acht Minuten

(PTM-48M Photosynthesis Monitor 2004). Mit Hilfe einer Kontrolltafel (Kontrollknöpfe und LED-Anzeigen) wird der Monitor überwacht (PTM-48M Photosynthesis Monitor 2004).



**Abbildung 3:** Phytomonitoringsystem mit Robosensor an *Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch und Datengewinnung.

Die Höhenanpassung der zu messenden Pflanzen erfolgte durch ein Stativ, in denen die Messküvetten montiert wurden. Die Phytomonitoring-Messungen wurden bei *Euphorbia pulcherrima* am fünftjüngsten voll entwickelten Blatt vorgenommen. Bei *Pelargonium zonale* wurden Blätter in ähnlicher Größe und Höhe ausgewählt.

## 2.7 Datenverarbeitung

Um die großen Datenmengen aufzubereiten, waren umfangreiche Strukturierungen und Berechnungen notwendig. In den Wochenblättern wurden anfangs nur die Klimafaktoren Temperatur, relative Luftfeuchte (beide Parameter separat für die Luxuswärmekabine, Referenzkabine und Außen), Globalstrahlung und Lichtmenge erfasst. Es wurden die Wochensummen sowie Mittelwerte für die Klimafaktoren berechnet.

Die Daten aus dem Klimacomputer über Temperatur, relative Feuchte, Globalstrahlung und Lichtmenge wurden im Fünf-Minuten-Takt aufgezeichnet. Der Phytomonitor PTM-48M ermittelte Werte im Abstand von 15 Minuten. Um diese beiden Datensätze in eine Datenbank zu bringen, wurden sie mittels linearer Interpolation in einen Fünf-Minuten-Takt synchronisiert.

Nach Kontrolle und Bereinigung der PTM-Datensätze wurden die Mittelwerte je Kabine berechnet und entsprechend ihrer zeitlichen Zuordnung in die Wochenblätter eingefügt.

Der Wachstumstrend der Pflanzen wurde anhand der prozentualen Abweichung ( $Z_n$ ) der Schattenflächenmessungsmittelwerte von  $KW_n$  gegenüber  $KW_{n-1}$  berechnet ( $Z_n = KW_n * 100 / KW_{n-1} - 100$ )

---

## **2.8 Statistische Analyse**

Die Überprüfung auf eine Korrelation der Schattenbildflächen der *Euphorbia pulcherrima* (letzte Messung je Versuch) und der Blattflächen wurde mit MS Excel vorgenommen. Durch den Kolmogorov-Smirnov-Test wurde anschließend auf Normalverteilung getestet.

Die Statistische Auswertung der Daten der *Pelargonium zonale* wurde mit dem Programm SPSS (Version 15.01) in der Form einer zweifaktoriellen Varianzanalyse durchgeführt. Als Test auf Normalverteilung des Merkmals wurde der Kolmogorov-Smirnov-Test verwendet. Anschließend wurde auf Signifikanz mit Hilfe des T-Tests getestet. Auf diese Weise wurden die Ergebnisse der Luxuswärmekabine und der Referenzkabine je Sorte für Versuch 1 und 2 untersucht.

### 3 Ergebnisse

Die Luxuswärmeversorgung von Zierpflanzen zeigt anhand von *Euphorbia pulcherrima* und *Pelargonium zonale*, dass die Reaktionen der Pflanzen auf eine veränderte Temperaturführung sehr unterschiedlich ausfällt. Die Euphorbien reagierten mit größeren Pflanzen und mit einer Rotfärbung der Brakteen wohingegen die meisten Sorten der Pelargonien eher ein vermehrtes generatives Wachstum zeigten. Alle untersuchten Pflanzen zeigten im Sinne des Ertrags und der Qualität positive Reaktionen auf die Luxuswärmeversorgung.

#### 3.1 Ergebnisse *Euphorbia pulcherrima*

##### 3.1.1 Klima und Phytomonitoring

Die erfassten Messwerte verdeutlichen, dass infolge der Außenwitterung die realen Temperaturbedingungen im Gewächshaus nicht durchgehend mit den angestrebten Sollwerten übereinstimmten. Während der ersten Kulturwochen lagen die Tagtemperaturen in der Referenzkabine über den Sollwerten bei etwa 20 °C (siehe 2.2), in den Mittagsstunden stiegen die Temperaturen bis 22 °C. Die Nachttemperatur lag ebenfalls über den angestrebten Temperaturen bei 18-19 °C. In späteren Kulturwochen bei niedrigeren Außentemperaturen und geringerer Lichtmenge erreichten die Tagtemperaturen Werte von 20 °C.

Dem entsprachen die Temperaturverhältnisse in der Luxuswärmekabine. Die Tagtemperaturen hatten Werte von 25 bis 27 °C. Nachts wurden Messwerte im Bereich 18-19 °C ermittelt.

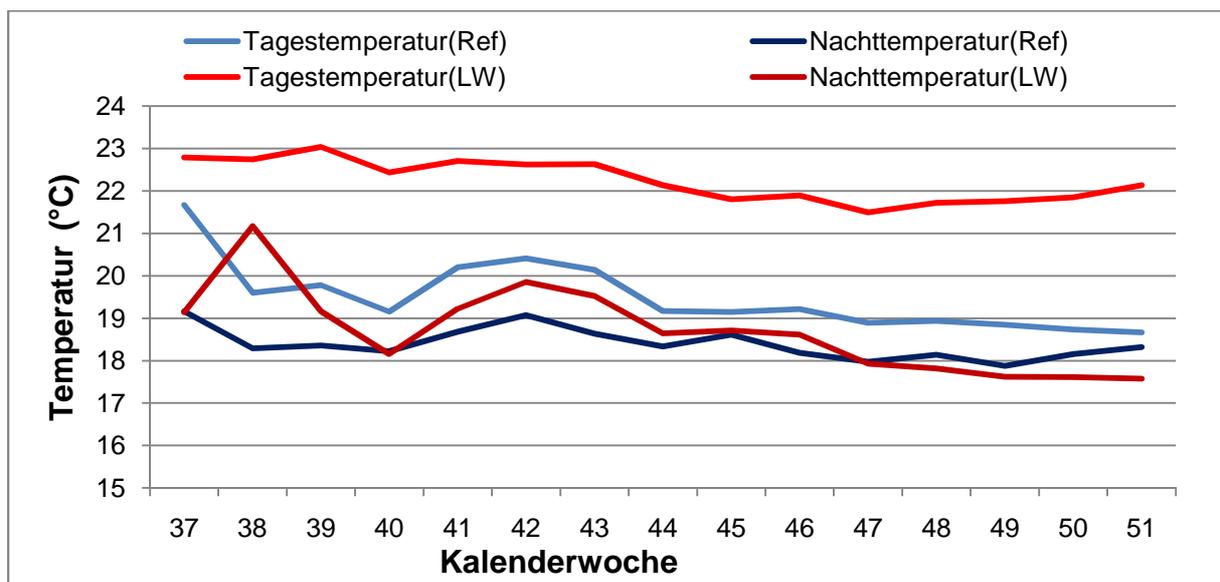


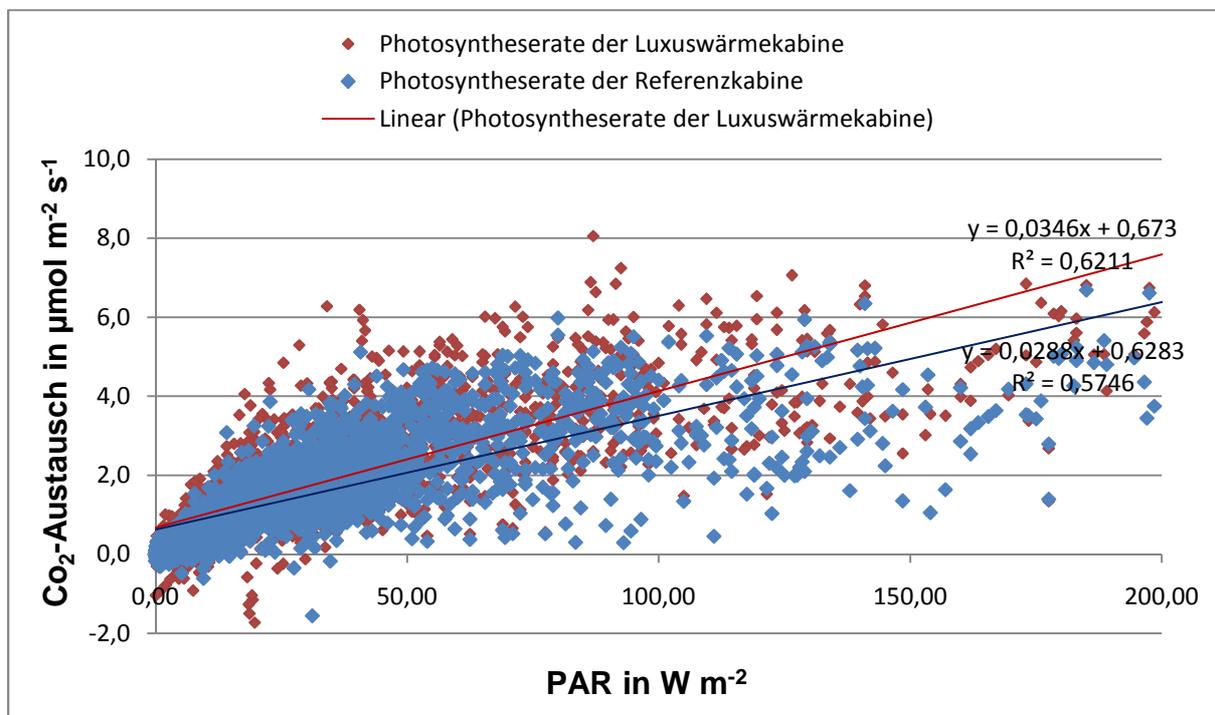
Abbildung 4: Mittelwerte der Tages- bzw. Nachttemperaturen von KW 37 bis 51.

Der Verlauf der relativen Luftfeuchte zeigte in der Luxuswärmekabine Schwankungen in der Amplitude. In beiden Gewächshauskabinen schwankten die Werte in etwa zwischen 40%- 60%. Anhand der Feuchtesummen kann man feststellen, dass die relative Feuchte im kühler geführten Bestand anstieg, wobei die des Warmhauses sank. Die beiden Kabinen differierten in Bezug auf ihr Dampfdrucksättigungsdefizit über den Beobachtungszeitraum um 27%. In der Referenzkabine lagen die Werte im Mittel 0,26 kPa unter denen der Luxuswärmestrategie.

In der Periode der Phytomonitoringaufzeichnungen von Kalenderwoche 44 bis 49, überstieg die Transpirationsrate der Luxuswärmekabine die der Referenzkabine um  $0,78 \text{ mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Der Lichteinfall in die Bestände sank im Versuchsverlauf jahreszeitlich bedingt stetig ab. Von durchschnittlich 41,4 klx im Tagesverlauf (Woche 37) bis auf 4,91 klx in Woche 51. Der größte Einbruch erfolgte in Woche 44. Nachdem die Lichtmengensumme für Woche 43 noch 2886 klx h auswies, betrug diese in den Folgewochen nur noch 1221 klx h.

Die Nettophotosyntheserate lag im Mittel während des gesamten Versuches bei  $1,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  in der Referenzkabine und bei  $1,6 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  in der Luxuswärmekabine (Abbildung 5).



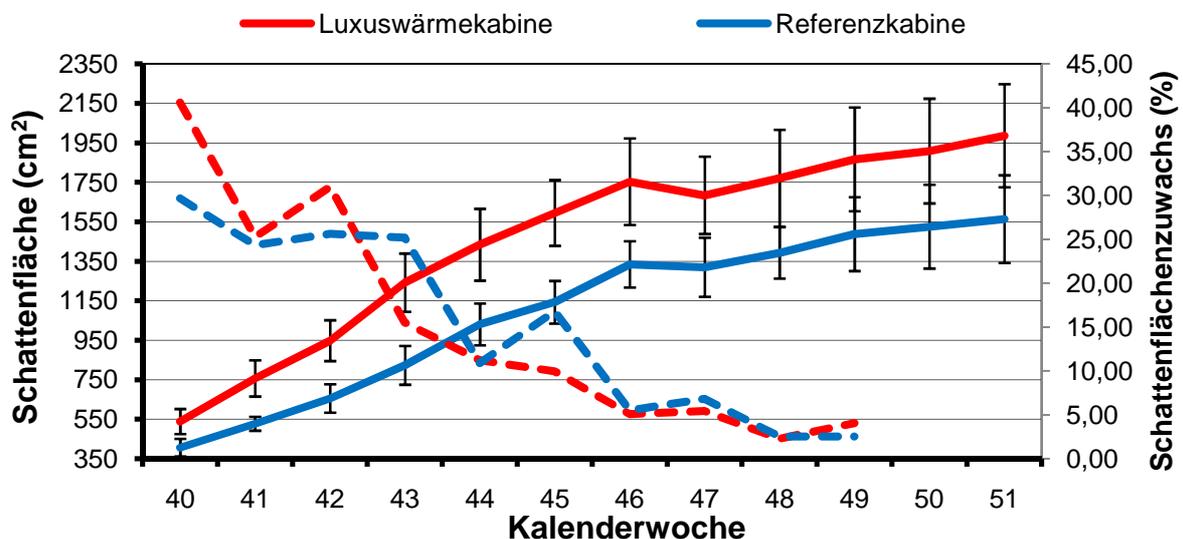
**Abbildung 5:** Photosyntheserate der Luxuswärmekabine und der Referenzkabine von *Euphorbia pulcherrima* in Abhängigkeit von der Strahlung (PAR).

### 3.1.2 Vegetatives Wachstum von *Euphorbia pulcherrima* anhand der Blattflächenprojektion

Kulturbegleitend wurde eine Blattflächenprojektion (Grundfläche) der Pflanzen mit Hilfe einer Kamera in regelmäßigen Zeitintervallen aufgenommen. In Abbildung 6 sind die Schattenbilder der Pflanzen in der Periode vom 6.10.2008 bis 16.10.2008 dargestellt. Während des gesamten Versuches waren die Schattenbildflächen der Pflanzen aus der Luxuswärmekabine größer als aus der Referenzkabine.

Auf der Basis der gewonnenen Werte wurde der Anstieg der Schattenbildfläche pro Tag berechnet. Anhand der Abbildung des Wachstumsverlaufes kann festgestellt werden, dass das Wachstum der Pflanzen aus der Referenzkabine einen linearen Verlauf zeigte. Während für die Pflanzen der Luxuswärmekabine ein exponentielles Wachstum ermittelt wurde. Der Zuwachs pro Tag betrug am Ende der Periode bei Pflanzen der Referenzkabine ca.  $27 \text{ cm}^2$ , während Pflanzen der Luxuswärmekabine durchschnittlich ca.  $55 \text{ cm}^2$  pro Tag wuchsen.

Der Wachstumsverlauf der *Euphorbia pulcherrima* von der Kalenderwoche 40 bis 51 zeigt, dass sich die Pflanzen in der Luxuswärmekabine bezüglich des vegetativen Wachstums besser entwickelten als in der Referenzkabine.



**Abbildung 6:** Verlauf des Schattenflächenzuwachses (gestrichelt) und der Schattenfläche(durchgezogen) bei *Euphorbia pulcherrima*.

In Kalenderwoche 38 wurden vereinzelt Welkesymptome an Seitentrieben festgestellt (Abbildung 7). An den betroffenen Pflanzen war der Stengelgrund hohl und lies sich leicht abknicken. Das war auf einen Trauermückenbefall zurückzuführen, begründet durch eine zu feuchte Kulturführung. Durch eine Behandlung mit *Steinernema feltiae* sowie andere Maßnahmen in der Wasserversorgung wurden später keine Erscheinungen dieser Art beobachtet und weitere Trauermückenschäden blieben

aus. In der 40. Kalenderwoche zeigten die Pflanzen der Referenzkabine teilweise Blattaufhellungen, welche auf Magnesiummangel zurückzuführen waren. Durch Gegenmaßnahmen wie eine Erhöhung des EC- Wertes auf 1,8 sowie eine Absenkung des pH-Wertes der Nährlösung auf 5,5 konnten diese Symptome im Versuchsverlauf behoben werden. Die Temperaturstrategie der Luxuswärmekabine bewirkte, dass die Pflanzen dieser Kabine keine Symptome zeigten.



**Abbildung 7:** Trauermückenschäden mit symptomatischen Welkeerscheinungen an den Seitentrieben.

### 3.1.3 Vegetatives Wachstum von *Euphorbia pulcherrima* Endbonitur

Die Anzahl von Blättern und Seitentrieben zeigten keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Luxuswärmeversorgung (Tabelle 1).

Alle weiteren vegetativen Merkmale der Pflanzen aus der Luxuswärmekabine hatten höhere Werte als aus der Referenzkabine. Die Pflanzenhöhe lag 5,4 cm (30%) und die Blattfläche 505 cm<sup>2</sup> (25%) über den Werten der Referenzstrategie. Die höchste Differenz wies die Stängeltrockenmasse mit 45% auf, wobei die Stängelfrischmasse nur 25% höher lag. Frisch- und Trockenmasse der Blätter waren im Verhältnis in etwa gleich und waren im Luxuswärmebestand 20% erhöht. Die Luxuswärmeversorgung der Pflanzen führte zu größeren Pflanzen mit größeren Blättern.

**Tabelle 1:** Ausprägung der bonitierten Merkmale ( $H_0$  für T-Test: Referenzkabine = Luxuswärmekabine.)

Merkmal	Referenzkabine		Luxuswärmekabine		Verhältniss in % (Referenzkabine = 100)	P (Zweiseitig)	Bemerkungen
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung			
Anzahl Seitentriebe	5,50	1,28	4,93	1,08	-	6,91E-02	Annahme $H_0$ ( $P > \alpha$ )!
Anzahl Blätter > 2 cm	65,47	10,91	69,37	9,17	-	1,40E-01	
Pflanzenhöhe in cm	16,75	2,10	22,15	2,62	132,24	3,86E-12	Ablehnung $H_0$ ( $P < \alpha$ )!
Blattfläche in $dm^2$	19,27	2,72	24,32	3,11	126,25	1,02E-08	
Stängelfrischmasse in g	20,82	3,90	26,60	4,02	127,75	5,07E-07	
Stängeltrockenmasse in 1/10 g	16,53	0,31	24,14	0,32	146,09	5,15E-13	
Frischmasse Blätter in g	28,08	4,24	34,32	4,62	122,23	1,09E-06	
Trockenmasse Blätter in 1/10 g	37,87	0,60	46,47	0,65	122,71	1,76E-06	

### 3.1.4 Generative Entwicklung von *Euphorbia pulcherrima*

Ab Kalenderwoche 45 konnte eine Rotfärbung der Brakteen in der Luxuswärmekabine beobachtet werden. Diese späte Entwicklung kann auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass keine Verdunklung zur Simulation von Kurztagen bestand und es durch Nachbarkabinen zu Störlichteinflüssen kam. Aufgrund dessen wurden seitliche Verdunkelungen in Form von schwarzer Folie angebracht.



**Abbildung 8:** *Euphorbia pulcherrima* der Luxuswärmekabine. Im Hintergrund sind noch nicht gefärbte Pflanzen der Referenzkabine zu sehen.

## 3.2 Ergebnisse *Pelargonium zonale*

### 3.2.1 Klima

Durch die Temperaturdifferenzierung in den Versuchskabinen wurden unterschiedliche Tagesmitteltemperaturen erzielt (Tabelle 2).

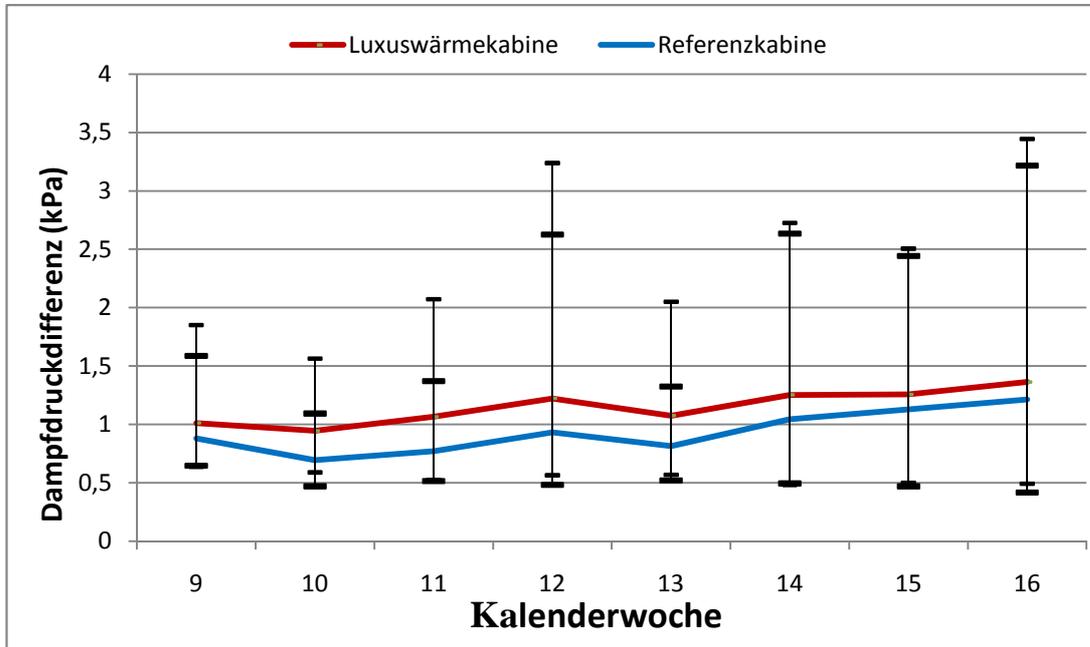
Bei dem ersten Versuch waren die Durchschnittstemperaturen in der Luxuswärmekabine mit 18,8 °C um 2,6 K höher als in der Referenzkabine mit 16,3 °C. In der 9. Kalenderwoche hatte die durchschnittliche Lufttemperatur in der Luxuswärmekabine einen Wert von 18,5 °C und in der Referenzkabine von 17,0 °C. Zum Ende des ersten Versuchs in der 16. Kalenderwoche waren die Durchschnittstemperaturen auf 19,9 °C in der Luxuswärmekabine und 18,0 °C in der Referenzkabine angestiegen. Die Temperatursumme je Woche hatte in der Luxuswärmekabine eine Höhe von 3152,1 °Ch und in der Referenzkabine von 2724,1 °Ch.

Die verschiedenen Temperaturstrategien hatten Auswirkungen auf die relative Luftfeuchte in den Kabinen. Diese war in der Luxuswärmekabine in der 9. Kalenderwoche mit 52,9 % im Vergleich zur Referenzkabine mit 54,8 % um 1,9 % niedriger. Durchschnittlich hatte die Luxuswärmekabine im ersten Versuchszeitraum eine relative Feuchte von 49,1 % und die Referenzkabine von 51,7 % und damit 2,6 % weniger. Während des zweiten Versuches war die relative Feuchte im Durchschnitt in der Luxuswärmekabine mit 44,3 % um 3,3 % niedriger als in der Referenzkabine mit 47,6 %.

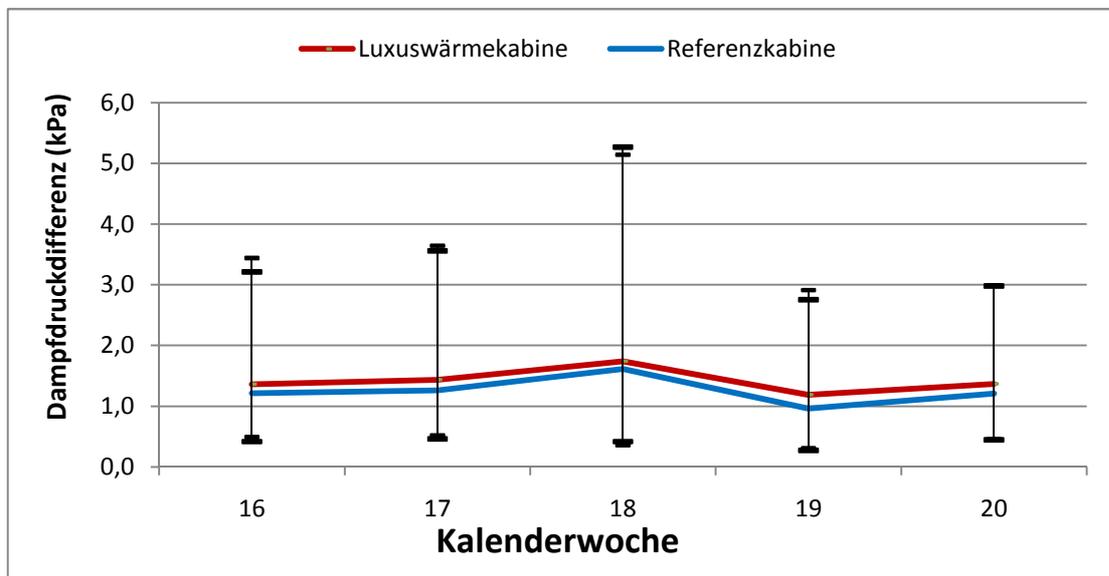
Die PAR-Strahlung variierte während des ersten Versuchszeitraums zwischen 546,25  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (PAR) in der 9. KW und 939,55  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (PAR) in der 15. KW (Abbildung 13). Während des zweiten Versuches lagen die Messwerte zwischen 895,85  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (PAR) in der 16. KW und 1112,05  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (PAR) in der 20. KW.

Die Dampfdruckdifferenz war in der Luxuswärmekabine im Durchschnitt um 0,214 kPa höher als in der Referenzkabine. Die Dampfdruckdifferenz war während des gesamten ersten Versuches in der Luxuswärmekabine etwas höher als in der Referenzkabine (Abbildung 9). Sie variierte in der Luxuswärmekabine zwischen 0,94 und 1,36 kPa im Durchschnitt. In der Referenzkabine lagen die Werte zwischen 0,69 und 1,21 kPa.

Während des zweiten Versuchszeitraumes lag die Dampfdruckdifferenz der Luxuswärmekabine im Durchschnitt zwischen 1,18 und 1,74 kPa. In der Referenzkabine waren die Werte im Mittel um 0,17 kPa kleiner mit 0,96 und 1,61 kPa (Abbildung 10).



**Abbildung 9:** Dampfdruckdifferenz der Referenzkabine und Luxuswärmekabine in der 9. bis 16. Kalenderwoche.



**Abbildung 10:** Dampfdruckdifferenz der Referenzkabine und Luxuswärmekabine in der 16. bis 20. Kalenderwoche.

**Tabelle 2:** Klimaparameter von *Pelargonium zonale*

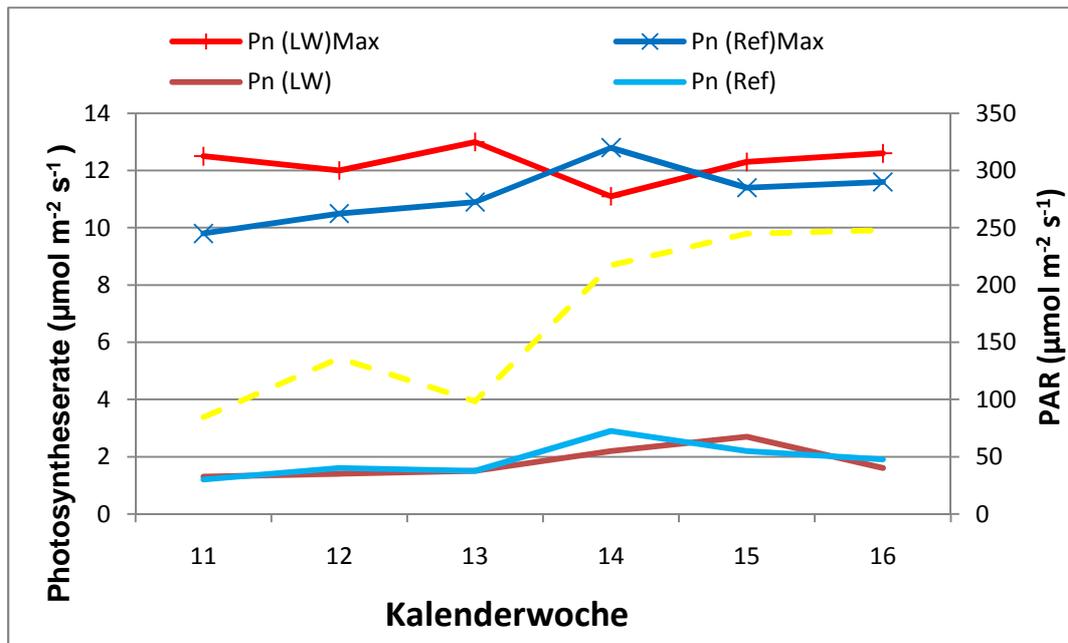
	Luxuswärmekabine		Referenzkabine	
	Mittelwert	Schwankungsbereich	Mittelwert	Schwankungsbereich
<b>Versuch 1</b>				
Temperatur(°C)	18,8	11,9...34,1	16,3	12,5...30,9
Temperatursummen (°C h d)	-	442,7...495,2	-	358,6...477,8
rel. Feuchte (%)	49,1	17,8...77,9	51,7	22,3...75,0
Feuchtesummen (% h d)	-	1268,8...1491,3	-	1334,2...1606,6
$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR	-	0...939,55	-	0...939,55
Dampfdruckdifferenz (kPa)	1,149	0,481...3,444	0,934	0,416...3,210
CO <sub>2</sub> Austausch in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	1,78	0...13,00	1,88	0...12,80
Transpiration in $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	2,25	0...46,50	3,00	0...58,30
<b>Versuch 2</b>				
Temperatur (°C)	20,1	12,2...36,3	18,5	12,8...37,6
Temperatursummen (°C h d)	-	495,2...541,6	-	476,3...530,2
rel. Feuchte (%)	44,3	10,9...80,9	47,6	15,6...83,6
Feuchtesummen (% h)	-	1094,7...1499,7	-	1232,6...1485,2
$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR	-	0...1112,05	-	0...1112,05
Dampfdruckdifferenz (kPa)	1,419	0,310...5,141	1,251	0,273...5,266

### 3.2.2 Phytomonitoring

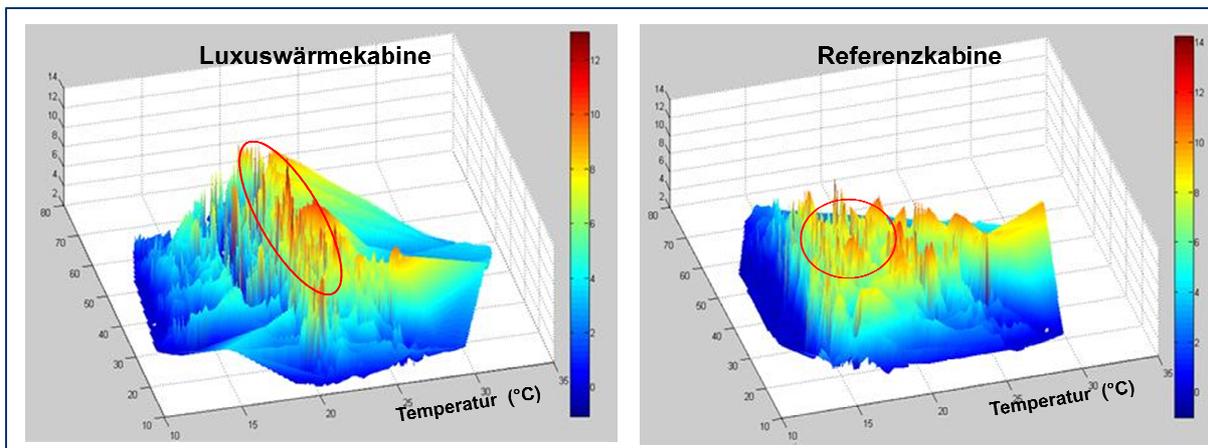
#### 3.2.2.1 Photosyntheserate

Die Photosyntheserate war von der 11. bis zur 13. KW in beiden Kabinen ähnlich hoch. Die Werte variierten im Durchschnitt von 1,3 bis 1,8  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  in der Luxuswärmekabine und 1,2 bis 1,6  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  in der Referenzkabine. In der 14. KW stieg der Durchschnittswert in der Referenzkabine mit 2,9  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  über den Wert in Luxuswärmekabine mit 2,2  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . In der 15. KW war der Wert in der Luxuswärmekabine mit 2,7  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  höher als in der Referenzkabine mit 2,2  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Abbildung 11). Die maximalen Photosynthesewerte der Luxuswärmekabine waren bis auf den Wert der 14. KW in der Luxuswärmekabine höher als in der Referenzkabine.

Das Maximum der Photosyntheseleistung der Pflanzen in der Luxuswärmekabine war bei 20 bis 25 °C und bei 30 bis 40 % relativer Feuchte erreicht und hatte Werte von 12 bis 14  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Bei Temperaturen unter 17 °C und über 27 °C sank die Photosyntheseleistung stark ab. Sie hatte in der Referenzkabine in Abhängigkeit von der Temperatur und der relativen Feuchte einen breiteren Wertebereich (Abbildung 12). Eine Rate von 8 bis 10  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  wurde zwischen 15 °C und 30 °C und einer relativen Feuchte von 25 bis 60 % erreicht. Je höher die Temperaturen stiegen, je schmaler wurde der optimale Bereich der relativen Feuchte hinsichtlich der Photosyntheseleistung. Die Maximalwerte der Photosyntheseleistung der Pflanzen der Luxuswärmekabine lagen außer in der Kalenderwoche 14 über den Werten der Referenzkabine (Abbildung 11).



**Abbildung 11:** Photosyntheserate (Mittelwerte und Maximalwerte) und PAR-Strahlung der 11. bis 16. Kalenderwoche der Luxuswärmekabine (LW) und Referenzkabine (Ref).

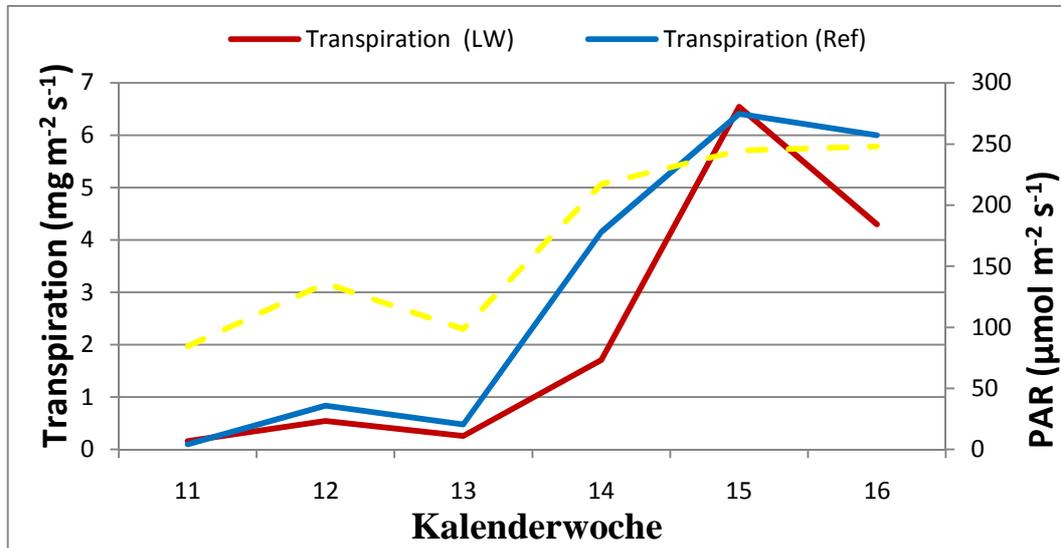


**Abbildung 12:** Dreidimensionale Darstellung der Photosynthesewerte in Abhängigkeit von der Temperatur (°C) und der relativen Feuchte (%) der Luxuswärmekabine und Referenzkabine mit den Zonen der maximalen Photosyntheseleistungen

### 3.2.2.2 Transpiration

Die Transpirationswerte der Pflanzen in der 11. und 15. KW waren in beiden Kabinen mit Mittelwerten von  $0,2 / 0,1 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  und  $6,5 / 6,4 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  gleich hoch. In den Kalenderwochen 14 und 16 war die Transpirationsrate in der Referenzkabine höher als in der Luxuswärmekabine. In den KW 11 und 12 war die Transpiration gering mit

Werten unter 1 kPa. Ab KW 13 nahm die Transpiration in beiden Kabinen stark zu, wobei sie in der Referenzkabine schneller stieg (Abbildung 13). Nach der 15. KW sank sie in der Luxuswärmekabine stärker als in der Referenzkabine.



**Abbildung 13:** Transpirationsrate und PAR-Strahlung der 11. bis 16. Kalenderwoche der Luxuswärmekabine (LW) und Referenzkabine (Ref).

### 3.2.3 Vegetatives Wachstum von *Pelargonium zonale* anhand der Blattflächenprojektion

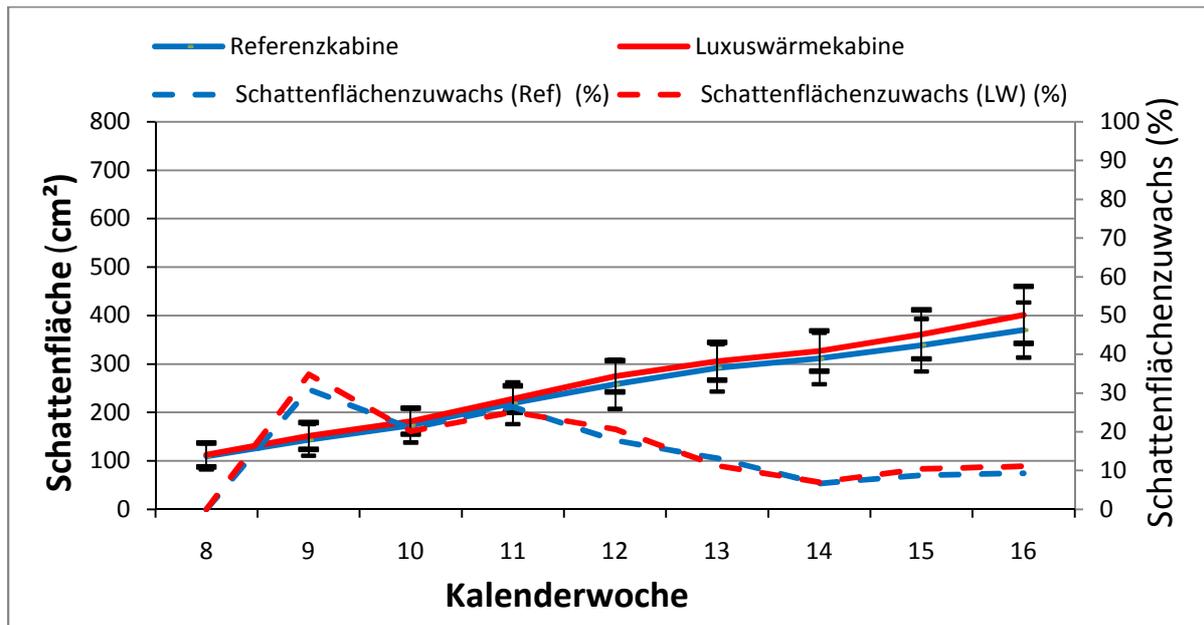
Um das Pflanzenwachstum zu dokumentieren, wurde einmal wöchentlich die Schattenbildfläche erfasst (siehe 2.5.1.1). Dabei wurde festgestellt, dass das Wachstum der Pflanzen und die Reaktionen auf eine höhere Temperaturführung je nach Sorte sehr unterschiedlich waren.

Mit Hilfe der Schattenbildanalyse wurde ermittelt, dass die Pflanzen der Sorte 'Anthony' in den Kalenderwochen 8 bis 16 in der Luxuswärmekabine in der Tendenz größer waren als in der Referenzkabine. Nach 14 Tagen hatten die Pflanzen dieser Sorte eine durchschnittliche Größe von 109,42 cm<sup>2</sup> in der Referenzkabine und 112,29 cm<sup>2</sup> in der Luxuswärmekabine. Zum Versuchsende hatten die Pflanzen der Referenzkabine eine Größe von 370,15 cm<sup>2</sup> und in der Luxuswärmekabine von 401,37 cm<sup>2</sup>. Die Schattenflächenzuwachsraten (%) der Luxuswärmekabine der Kalenderwochen 8, 9, 12, 14, 15 und 16 lagen leicht über den Zuwachsraten der Referenzkabine. In den Wochen 10, 11 und 13 waren die Zuwachsraten der Pflanzen der Luxuswärmestrategie geringer als im Referenzhaus. Bei einem durchschnittlichen Wachstum pro Tag von 4,72 cm<sup>2</sup> in der Referenzkabine und 5,20 cm<sup>2</sup> in der Luxuswärmekabine und einem durchschnittlichen Wachstum pro Woche

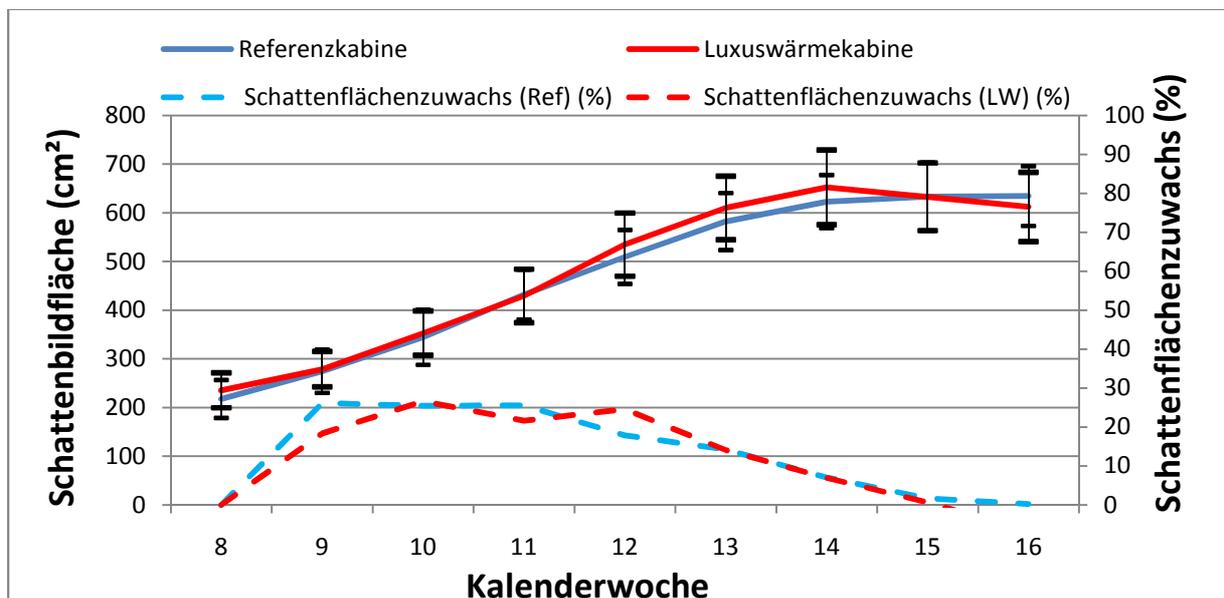
von 32,83 cm<sup>2</sup> in der konventionellen Klimaführung und 36,12 cm<sup>2</sup> bei der Luxuswärmestrategie ist eine Tendenz zur größeren Schattenbildfläche und damit zu größeren Pflanzen der Sorte 'Anthony' in der Luxuswärmekabine zu erkennen.

Die Schattenbildflächen der Pflanzen der Sorte 'Candy Rose' des ersten Versuches waren bei 6 von 9 Messungen in der Luxuswärmekabine etwas größer als in der Referenzkabine. Nach einer Kulturdauer von 14 Tagen hatten die Pflanzen der Luxuswärmekabine eine Größe von in Durchschnitt 235,49 cm<sup>2</sup> und in der Referenzkabine von 217,55 cm<sup>2</sup>. In der 11., 15. und 16. Kalenderwoche waren die Pflanzen in der Referenzkabine größer als in der Luxuswärmekabine, jedoch ohne signifikante Unterschiede zu zeigen. Sie hatten in der 16. Kalenderwoche in der Luxuswärmekabine eine Größe von durchschnittlich 612,17 cm<sup>2</sup> und in der Referenzkabine eine durchschnittliche Größe von 634,60 cm<sup>2</sup>. Die Pflanzen von 'Candy Rose' wuchsen im Mittel pro Tag um 6,67 cm<sup>2</sup> in der Luxuswärmekabine und um 7,91 cm<sup>2</sup> in der Referenzkabine. Diese Werte entsprechen einem wöchentlichen Wachstum von 46,83 cm<sup>2</sup> bzw. 55,53 cm<sup>2</sup>. Da die Werte für diese Sorte keine signifikanten Unterschiede für die zwei unterschiedlichen Temperaturführungen zeigen und je nach Kalenderwoche in der einen bzw. der anderen Kabine höher sind, kann anhand der Schattenbildfläche keine eindeutige Aussage über eine positive oder negative Auswirkung der Luxuswärmestrategie getroffen werden. In der Tendenz waren die Pflanzen zum Verkaufszeitpunkt in der Referenzkabine um 22,43 cm<sup>2</sup> größer als in der Luxuswärmekabine.

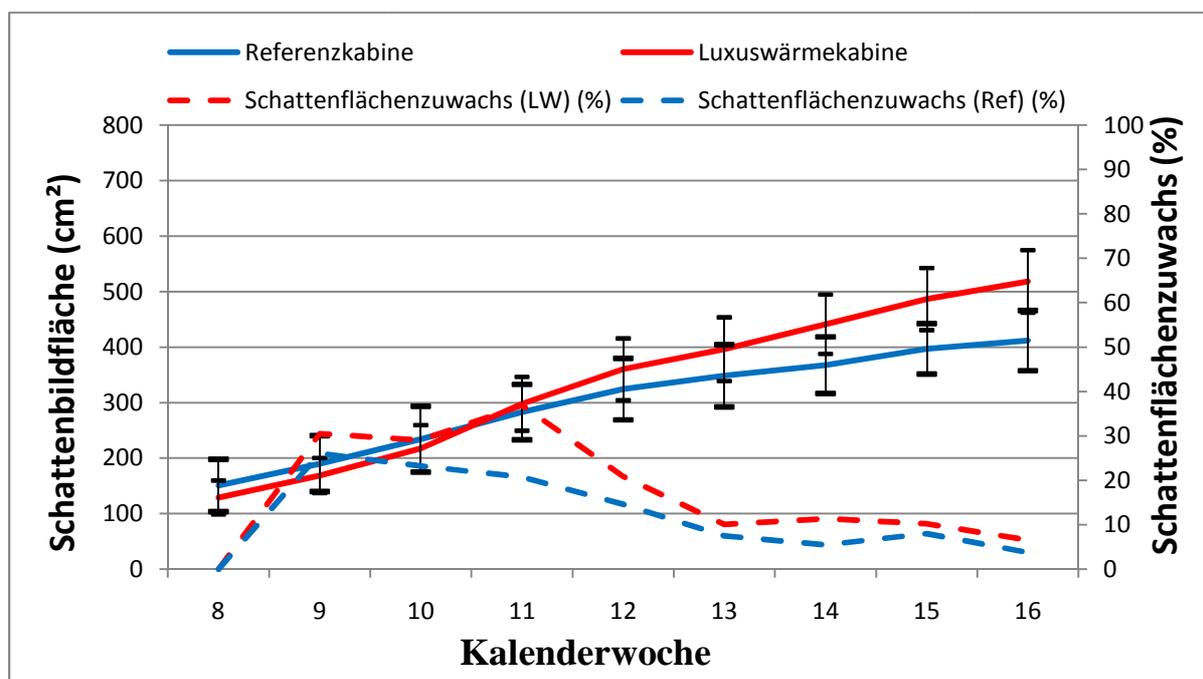
Die Auswertung des Wachstums anhand der Schattenbildfläche für die Sorte 'Sassa' zeigt, dass die Pflanzen dieser Sorte in der Luxuswärmekabine im Mittel ein tägliches Wachstum von 6,94 cm<sup>2</sup> und in der Referenzkabine von 4,85 cm<sup>2</sup> hatten, das entspricht einem wöchentlichen Wachstum von 38,30 cm<sup>2</sup> bzw. 34,07 cm<sup>2</sup>. Nach 14 Tagen Versuchsdauer hatten die Pflanzen in der Luxuswärmekabine eine Größe von 129,19 cm<sup>2</sup> und in der Referenzkabine von 150,82 cm<sup>2</sup>. Sie waren in der 8., 9. und 10. Kalenderwoche in der Luxuswärmekabine kleiner als in der Referenzkabine. Von der 13. bis zur 16. Kalenderwoche waren die Schattenbildflächen der Sorte 'Sassa' in der Luxuswärmekabine signifikant größer als in der Referenzkabine. Zum Verkaufszeitpunkt hatten die Pflanzen eine Größe von 518,25 cm<sup>2</sup> in der Luxuswärmekabine und 411,77 cm<sup>2</sup> in der Referenzkabine und hatten damit in der Luxuswärmekabine eine deutlich bessere Qualität. Die Luxuswärmestrategie hatte eine positive Auswirkung auf das Wachstum der Sorte 'Sassa'.



**Abbildung 14:** Schattenbildflächen und Schattenbildflächenzuwachs (%) der Luxuswärmekabine (LW) und der Referenzkabine (Ref) in der 8. bis 16. Kalenderwoche der Sorte 'Anthony'.



**Abbildung 15:** Schattenbildflächen und Schattenbildflächenzuwachs (%) der Luxuswärmekabine (LW) und der Referenzkabine (Ref) in der 8. bis 16. Kalenderwoche der Sorte 'Candy Rose'.

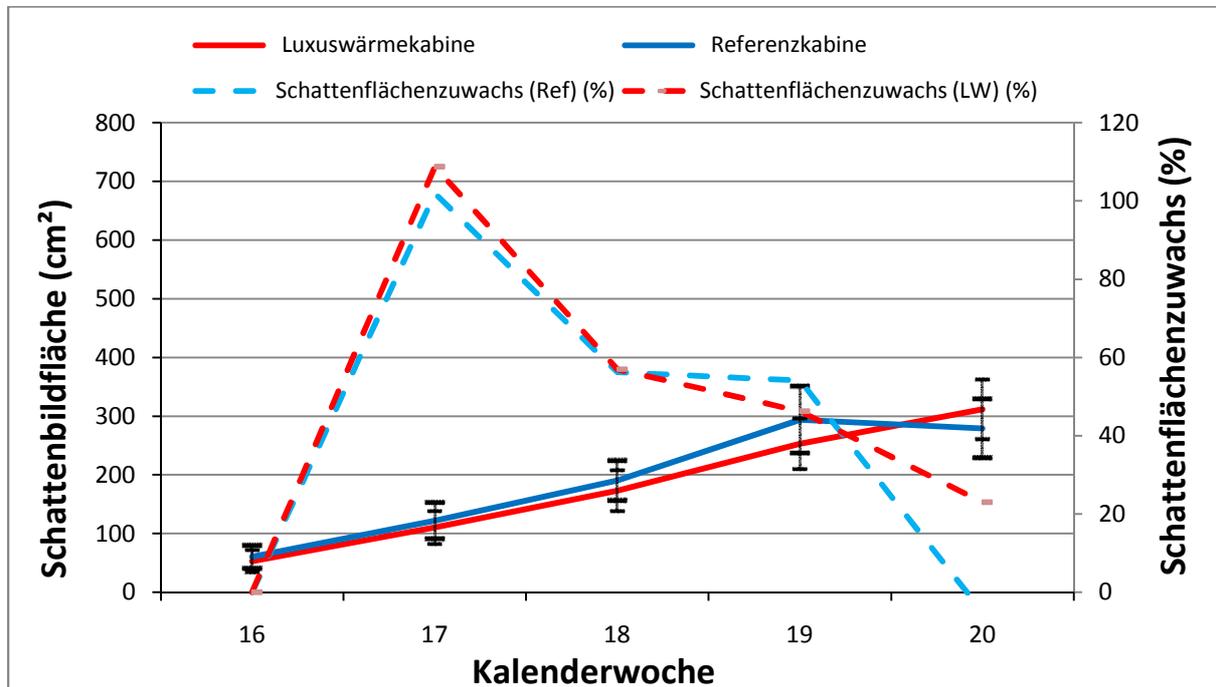


**Abbildung 16:** Schattenbildfläche und Schattenflächenzuwachs (%) der Luxuswärmekabine (LW) und Referenzkabine (Ref) in der 8. bis 16. Kalenderwoche der Sorte 'Sassa'.

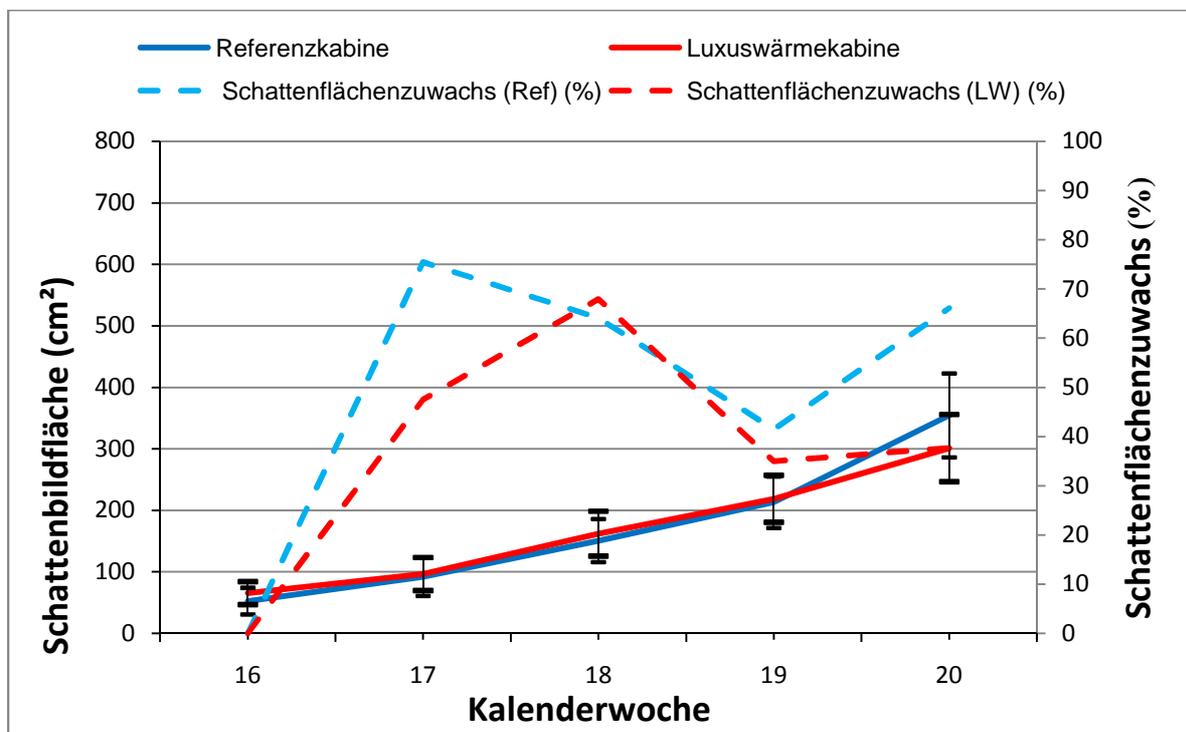
Die Pflanzen der Sorte 'Emilia' waren von der 16. bis zur 18. KW in der Luxuswärmekabine in der Tendenz etwas kleiner als in der Referenzkabine. In der 19. KW waren sie in der Referenzkabine signifikant größer als in der Luxuswärmekabine. In der 20. KW zum Verkaufszeitpunkt waren die Pflanzen dieser Sorte mit  $311,57 \text{ cm}^2$  in der Luxuswärmekabine größer als in der Referenzkabine mit durchschnittlich  $279,19 \text{ cm}^2$ . Das tägliche Wachstum hatte eine Größe von  $9,24 \text{ cm}^2$  in der Luxuswärmekabine und  $7,81 \text{ cm}^2$  in der Referenzkabine. Entsprechend war das wöchentliche Wachstum in der Luxuswärmekabine mit  $64,69 \text{ cm}^2$  größer als in der Referenzkabine mit durchschnittlich  $54,68 \text{ cm}^2$ .

Die Sorte 'Shocking Pink' hatte von der 16. bis zur 19. KW etwas größere Schattenbildflächen bei den Pflanzen aus der Luxuswärmekabine, ohne jedoch signifikante Unterschiede zu zeigen. Bei der Messung in der 20. KW waren die Schattenbilder der Luxuswärmekabine mit einer durchschnittlichen Größe von  $301,24 \text{ cm}^2$  signifikant kleiner als in der Referenzkabine mit durchschnittlich  $354,38 \text{ cm}^2$ . Das Wachstum der Pflanzen pro Tag hatte einen Wert von  $8,42 \text{ cm}^2$  in der Luxuswärmekabine und  $10,79 \text{ cm}^2$  in der Referenzkabine, und entsprechend in der Woche ein Wachstum von im Durchschnitt  $58,95 \text{ cm}^2$  in der Luxuswärmestrategie

und 75,51 cm<sup>2</sup> in der Referenzkabine. Die Pflanzen dieser Sorte entwickelten sich ausgehend vom Parameter der Schattenbildfläche in der Referenzkabine besser.



**Abbildung 17:** Schattenbildfläche und Schattenflächenzuwachs (%) der Luxuswärmekabine (LW) und der Referenzkabine (Ref) in der 16. bis 20. KW der Sorte 'Emilia'.



**Abbildung 18:** Schattenbildfläche und Schattenflächenzuwachs (%) in der 16. bis 20. Kalenderwoche der Sorte 'Shocking Pink'.

#### 3.2.4 Vegetatives Wachstum anhand der Endbonitur

Die Ergebnisse der Endbonitur zeigen, dass die Auswirkungen der Luxuswärmestrategie bei einer von fünf Sorten bezüglich der vegetativen Pflanzenparameter positiv war (Tabelle 3, Tabelle 4). Bei der Sorte 'Sassa' waren die Auswirkungen auf nahezu alle Parameter signifikant oder in der Tendenz positiv. Untersucht man die Sorten nach den Parametern FM und TM von Blättern und Stängeln, Blattfläche und GI1, zeigt sich, dass die Sorten 'Anthony' und 'Candy Rose' auf eine Luxuswärmeversorgung ähnlich reagierten. Blattfläche und GI1 waren in der Luxuswärmekabine grösser wohingegen FM und TM von Blättern und Stängeln kleiner waren als in der Referenzkabine. Die untersuchten Parameter der Sorten 'Emilia' und 'Shocking Pink' waren in der Referenzkabine größer als in der Luxuswärmekabine.

Tabelle 3: Pflanzenbauliche Parameter (vegetativ) der Sorten 'Anthony', 'Candy Rose' und 'Sassa'. (x= nicht signifikant, - = signifikant)

Sorte	Pflanzenbauliche Parameter	Luxuswärmekabine		Referenzkabine		Differenz	Annahme von H <sub>0</sub>
		Mittelwert	STABW	Mittelwert	STABW		
Anthony	Seitentriebe	3,20	0,76	2,97	0,85	-0,23	x
	Blätter > 2cm	38,40	4,03	37,63	6,29	-0,77	x
	Pflanzenhöhe 1 (cm)	3,93	0,87	3,05	0,70	-0,88	-
	Durchm.1 (cm)	20,62	2,44	19,73	1,86	-0,88	x
	Durchm.2 (cm)	20,38	2,37	19,40	2,41	-0,98	x
	Blattfläche (cm <sup>2</sup> )	729,40	93,28	700,37	125,88	-29,03	x
	Frischmasse Stängel (g)	13,94	2,06	14,55	2,45	0,61	x
	Trockenmasse Stängel (g)	1,42	0,24	1,63	0,28	0,21	-
	Frischmasse Blatt (g)	32,29	5,00	34,17	5,65	1,88	x
	Trockenmasse Blatt (g)	2,72	0,41	3,00	0,51	0,28	-
	GI 1	14,98	1,32	14,06	1,02	-0,92	-
	LAI	1,82	0,23	1,75	0,31	-0,07	x
	spez BM (mg cm <sup>-2</sup> )	3,73	0,26	4,31	0,40	0,58	-
	BF/Blatt (cm <sup>2</sup> )	19,09	2,39	18,80	2,86	-0,29	x
Candy Rose	Seitentriebe	2,23	0,50	2,77	0,57	0,53	-
	Blätter > 2cm	33,30	3,66	29,03	3,82	-4,27	-
	Pflanzenhöhe 1 (cm)	6,75	1,41	5,50	1,48	-1,25	-
	Durchm.1 (cm)	28,43	3,36	27,10	3,24	-1,33	x
	Durchm.2 (cm)	27,63	3,63	27,73	3,28	0,10	x
	Blattfläche (cm <sup>2</sup> )	1161,72	99,22	1153,78	109,43	-7,93	x
	Frischmasse Stängel (g)	19,52	2,35	20,53	2,58	1,01	x
	Trockenmasse Stängel (g)	2,63	0,40	3,03	0,51	0,40	-
	Frischmasse Blatt (g)	44,60	3,84	46,82	4,79	2,22	x
	Trockenmasse Blatt (g)	3,92	0,41	4,19	0,44	0,27	-
	GI 1	20,94	1,31	20,11	1,22	-0,83	-
	LAI	2,32	0,20	2,31	0,22	-0,02	x
	spez BM (mg cm <sup>-2</sup> )	3,39	0,33	3,63	0,23	0,25	-
	BF/Blatt (cm <sup>2</sup> )	35,20	4,08	40,24	5,29	5,05	-
Sassa	Seitentriebe	2,93	0,74	3,03	0,72	0,10	x
	Blätter > 2cm	26,47	5,56	33,63	12,36	7,17	-
	Pflanzenhöhe 1 (cm)	5,43	1,48	2,53	0,67	-2,90	-
	Durchm.1 (cm)	22,83	2,45	20,47	1,96	-2,37	-
	Durchm.2 (cm)	23,80	2,25	21,10	3,19	-2,70	-
	Blattfläche (cm <sup>2</sup> )	864,41	140,15	702,50	154,25	-161,91	-
	Frischmasse Stängel (g)	18,29	4,47	17,26	4,34	-1,02	x
	Trockenmasse Stängel (g)	2,23	0,56	2,22	0,52	-0,01	x
	Frischmasse Blatt (g)	37,77	6,30	33,95	7,29	-3,82	-
	Trockenmasse Blatt (g)	3,07	0,50	2,94	0,60	-0,13	x
	GI 1	17,36	1,55	14,70	1,41	-2,66	-
	LAI	2,16	0,35	1,76	0,39	-0,40	-
	spez BM (mg cm <sup>-2</sup> )	3,55	0,23	4,22	0,39	0,66	-
	BF/Blatt (cm <sup>2</sup> )	33,65	6,67	22,85	7,20	-10,80	-

Auf die Pflanzen des zweiten Versuchs hatte die Luxuswärmestrategie auf die vegetativen Pflanzenparameter nahezu keine positiven Auswirkungen.

Tabelle 4: Pflanzenbauliche Parameter (vegetativ) der Sorten 'Emilia' und 'Shocking Pink'.

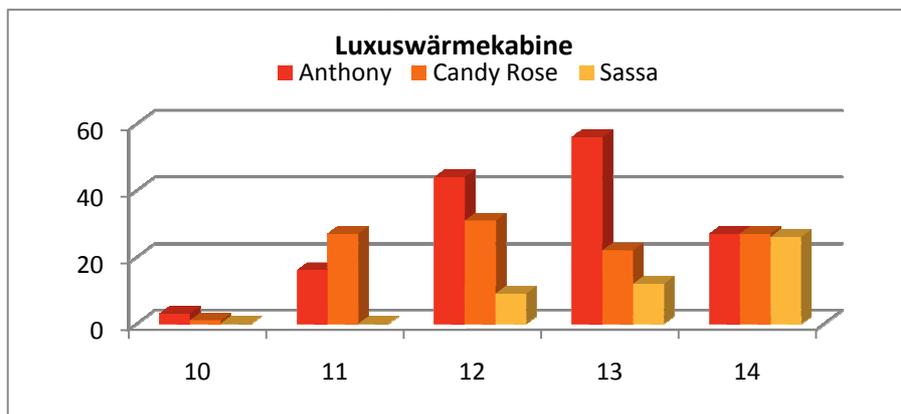
Sorte	Pflanzenbauliche Parameter	Luxuswärmekabine		Referenzkabine		Differenz	Annahme von H <sub>0</sub>
		Mittelwert	STABW	Mittelwert	STABW		
Emilia	Seitentriebe	2,20	0,61	2,40	0,62	0,20	x
	Blätter > 2cm	20,23	3,06	22,63	2,91	2,40	-
	Pflanzenhöhe 1 (cm)	3,48	1,16	4,20	1,15	0,72	-
	Durchm.1 (cm)	20,02	1,77	20,33	2,67	0,32	x
	Durchm.2 (cm)	19,00	2,08	20,73	2,76	1,73	-
	Blattfläche (cm <sup>2</sup> )	492,09	71,28	590,80	93,02	98,71	-
	Frischmasse Stängel (g)	7,45	1,33	9,42	1,94	1,98	-
	Trockenmasse Stängel (g)	0,91	0,20	1,05	0,22	0,15	-
	Frischmasse Blatt (g)	21,29	3,17	26,30	4,21	5,01	-
	Trockenmasse Blatt (g)	2,02	0,29	2,52	0,38	0,50	-
	GI 1	14,17	1,14	15,09	1,53	0,92	-
	LAI	1,23	0,18	1,48	0,23	0,25	-
	spez BM (mg cm <sup>-2</sup> )	4,12	0,31	4,27	0,30	0,16	x
	BF/Blatt (cm <sup>2</sup> )	24,59	3,57	26,20	3,28	1,61	x
Shocking Pink	Seitentriebe	1,93	0,87	2,23	0,77	0,30	x
	Blätter > 2cm	19,93	3,16	20,77	3,93	0,83	x
	Pflanzenhöhe 1 (cm)	2,37	0,87	2,23	0,99	-0,13	x
	Durchm.1 (cm)	16,55	1,84	16,02	3,18	-0,53	x
	Durchm.2 (cm)	17,38	1,88	16,48	2,40	-0,90	x
	Blattfläche (cm <sup>2</sup> )	344,39	89,81	379,81	109,68	35,42	x
	Frischmasse Stängel (g)	5,11	1,53	6,23	2,32	1,13	-
	Trockenmasse Stängel (g)	0,64	0,23	0,80	0,33	0,17	-
	Frischmasse Blatt (g)	14,99	3,96	17,42	5,09	2,43	-
	Trockenmasse Blatt (g)	1,41	0,41	1,68	0,50	0,27	-
	GI 1	12,10	1,20	11,58	1,54	-0,52	x
	LAI	0,86	0,22	0,95	0,27	0,09	x
	spez BM (mg cm <sup>-2</sup> )	4,08	0,36	4,42	0,31	0,34	-
	BF/Blatt (cm <sup>2</sup> )	17,10	2,63	18,10	2,91	1,00	x
H <sub>0</sub> : Luxuswärmekabine = Referenzkabine (x)							
H <sub>A</sub> : Luxuswärmekabine ≠ Referenzkabine (-)							

### 3.2.5 Generative Entwicklung von *Pelargonium zonale*

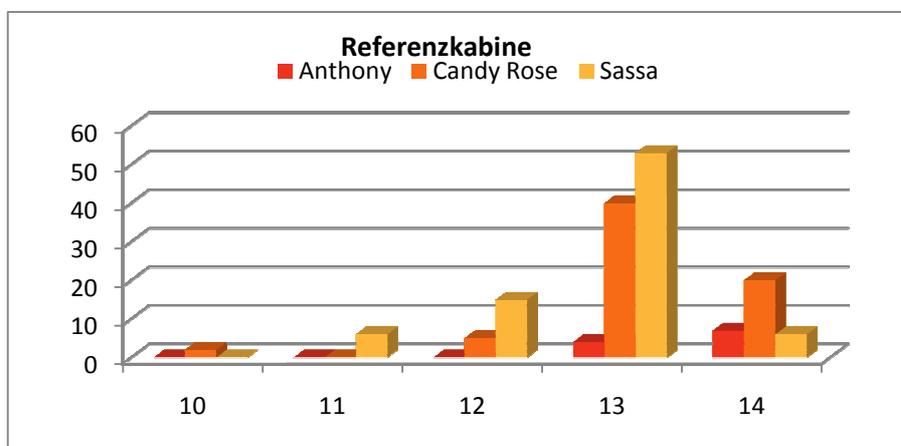
Auf die generativen Pflanzenteile hatte die Luxuswärmeversorgung bei allen untersuchten Sorten positive Auswirkungen. In der Luxuswärmekabine wurde mit 305

Blütenständen im Zeitraum von der 10. bis zur 14. KW eine doppelt so hohe Anzahl von Blüten (unabhängig von der Sorte) erzielt wie in der Referenzkabine mit 149. Zwei Wochen nach Blühbeginn gab es in der Luxuswärmekabine bereits 131 Blüten im Gegensatz zu 28 Blüten in der Referenzkabine. (Abbildung 19, Abbildung 20).

Die Luxuswärmestrategie hatte in Bezug auf die Blütenbildung der Sorte 'Sassa' die größte Auswirkung. Im untersuchten Zeitraum bildeten sich in der Referenzkabine nur 36 Blütenstände. Mit 158 Blütenständen war der Wert in der Luxuswärmekabine etwa viermal so hoch. Bei den Sorten 'Anthony' und 'Candy Rose' war in der Luxuswärmekabine die Anzahl von Blütenständen fast doppelt so hoch wie in der Referenzkabine. Diese Auswertung zeigt, dass die Stärke der Auswirkung auf die Blütenbildung ebenfalls sortenabhängig war. Jedoch war die Anzahl der entfernten Blütenstände insgesamt bei allen Sorten in der Luxuswärmekabine deutlich höher als in der Referenzkabine.



**Abbildung 19:** Die entfernten Blütenstände von der 10. bis zur 14. Kalenderwoche der Luxuswärmekabine (LW) von den Sorten 'Anthony', 'Candy Rose' und 'Sassa'.



**Abbildung 20:** Die entfernten Blütenstände von der 10. bis zur 14. Kalenderwoche und der Referenzkabine (Ref) von den Sorten 'Anthony', 'Candy Rose' und 'Sassa'.

Tabelle 5: Pflanzenbauliche Parameter (generativ) von 'Anthony', 'Candy Rose' und 'Sassa'.

Sorte	Pflanzenbauliche Parameter	Luxuswärmekabine		Referenzkabine		Differenz	Annahme von $H_0$
		Mittelwert	STABW	Mittelwert	STABW		
Anthony	Blütenstände	2,83	1,02	1,47	0,86	-1,37	-
	Knospenstände	2,63	1,16	2,97	1,00	0,33	x
	Frischmasse Blüte (g)	18,65	4,22	12,65	4,48	-5,99	-
	Trockenmasse Blüte (g)	2,34	0,51	1,60	0,58	-0,74	-
	Pflanzenhöhe2 (cm)	16,95	1,72	14,68	2,38	-2,27	-
	GI2	19,32	1,71	17,94	1,46	-1,38	-
Candy Rose	Blütenstände	2,43	0,86	1,57	0,73	-0,87	-
	Knospenstände	1,77	0,94	2,37	0,76	0,60	-
	Frischmasse Blüte (g)	21,69	5,56	17,16	4,25	-4,53	-
	Trockenmasse Blüte (g)	2,83	0,68	2,38	0,55	-0,45	-
	Pflanzenhöhe2 (cm)	22,28	2,05	20,07	3,02	-2,22	-
	GI2	26,12	1,43	24,97	1,77	-1,15	-
Sassa	Blütenstände	3,47	1,36	2,57	1,04	-0,90	-
	Knospenstände	2,83	0,91	3,60	1,04	0,77	-
	Frischmasse Blüte (g)	18,30	4,38	15,72	3,93	-2,57	-
	Trockenmasse Blüte (g)	2,32	0,56	2,03	0,53	-0,29	-
	Pflanzenhöhe2 (cm)	20,37	1,96	14,62	1,82	-5,75	-
	GI2	22,33	1,54	18,73	1,56	-3,61	-
H <sub>0</sub> : Luxuswärmekabine = Referenzkabine (x)							
H <sub>A</sub> : Luxuswärmekabine ≠ Referenzkabine (-)							

Tabelle 6: Pflanzenbauliche Parameter (generativ) von 'Emilia' und 'Shocking Pink'.

Sorte	Pflanzenbauliche Parameter	Luxuswärmekabine		Referenzkabine		Differenz	Annahme von $H_0$
		Mittelwert	STABW	Mittelwert	STABW		
Emilia	Blütenstände	1,43	0,63	0,63	0,67	-0,80	-
	Knospenstände	1,00	0,45	1,23	0,73	0,23	x
	Frischmasse Blüte (g)	8,50	2,76	5,21	3,09	-3,28	-
	Trockenmasse Blüte (g)	1,08	0,32	0,62	0,31	-0,46	-
	Pflanzenhöhe2 (cm)	16,48	2,06	15,45	2,85	-1,03	x
	GI 2	18,50	1,30	18,84	2,04	0,34	x
Shocking Pink	Blütenstände	2,50	1,04	0,97	0,93	-1,53	-
	Knospenstände	2,07	0,91	2,10	0,84	0,03	x
	Frischmasse Blüte (g)	13,83	4,43	7,95	4,64	-5,88	-
	Trockenmasse Blüte (g)	1,72	0,39	0,93	0,54	-0,79	-
	Pflanzenhöhe2 (cm)	14,93	2,20	13,85	2,76	-1,08	x
	GI 2	16,29	1,60	15,45	1,84	-0,84	x
H <sub>0</sub> : Luxuswärmekabine = Referenzkabine (x)							
H <sub>A</sub> : Luxuswärmekabine ≠ Referenzkabine (-)							

## 4 Diskussion

### 4.1 Diskussion *Euphorbia pulcherrima*

#### 4.1.1 Klimaführung

Die Abweichungen der Messwerte von den gewünschten Temperaturen sind in den ersten Versuchswochen hauptsächlich auf die außenklimatischen Bedingungen zurückzuführen. Auch aus den Mittelwerten der Tag- / Nachttemperaturen im Vergleich zu den Außentemperaturen wird deutlich, dass es eine Abhängigkeit zwischen Außen- und Innenklima gibt. Dies beschreibt auch Ludolph (2008). Allerdings ist dieser Zusammenhang so gering (für beide Häuser  $R^2 = 0,14$ ), dass hier nicht weiter darauf eingegangen werden soll.

Da die Unter-Tisch-Heizung konstant auf 20 °C eingestellt war, konnte die angestrebte Nachttemperatur von 16 °C nicht erreicht werden. Es öffnete sich häufiger die Lüftung, was zu einer starken Entfeuchtung der Gewächshausluft führte. Dadurch kam es unbeabsichtigt zum sogenannten „Trockenheizen“ (Schmidt 2008). Als Vorteil kann die trockene Luft angesehen werden, welche hilft Pflanzenkrankheiten vorzubeugen (Hallmann et al. 2007, Horn 1996). Als Nachteil ist der stark erhöhte Energieverbrauch zu nennen, der allerdings durch das verzögerte Wirksamwerden einer Solltemperaturänderung in einer trägen Bodenheizung in der Praxis ohnehin nicht zu vermeiden ist.

Die verringerte relative Luftfeuchte und das erhöhte Dampfdruckdefizit führten zu erhöhter Transpiration der Pflanzen in der Luxuswärmekabine. Für die Nacherntephase stellte sich dies als positiv dar, da die Pflanzen der Luxuswärmestrategie besser an Stress in Form von geringerer relativer Feuchte der Luft in Wohn- und Arbeitsräumen angepasst waren.

#### 4.1.2 Wachstum und vegetative Entwicklung

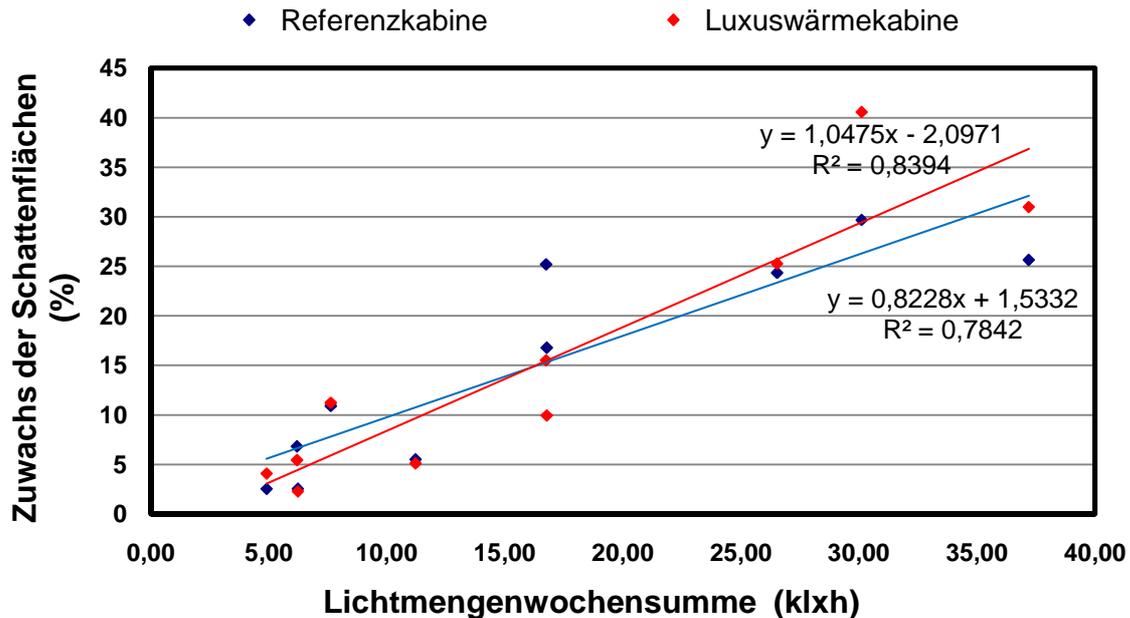
Unter den klimatischen Wachstumsfaktoren wirken sich Temperatur und Licht besonders stark auf *E. pulcherrima* aus (Horn 1996). Höhere Temperaturen führen im Bereich von 14 bis 26 °C nach Kristoffersen (1969) zu erhöhtem Streckungswachstum und sind damit förderlich für die Pflanzengröße. Unter anderem untersuchte Kristoffersen (1996) Temperaturkombinationen von 18/18 °C und 24/18 °C, welche bei eintriebigen Pflanzen nach sechs Wochen zu einer Differenz von neun Zentimetern führte.

Im vorliegenden Versuch betrug die Differenz zwischen den Mittelwerten der Stichproben, nach 14,5 Wochen etwa fünf Zentimeter. Moe et al.(1992) untersuchten die Wirkung von Temperaturabsenkungen auf *E. pulcherrima*, dabei zeigte die Sorte „Starlight“ bei einer Absenkung von 19 °C auf 13 °C für zwei Stunden eine Reduktion von mehr als fünf Zentimetern (auf 15,1 cm), gegenüber der durchgängig mit 19 °C behandelten Referenzkultur (20,3 cm) (Horn 1996).

Von gleicher Wirkung ist auch für den vorliegenden Versuch auszugehen.

Reinders (2008) schreibt, dass die Temperatur während der Lichtphase entscheidend für das Längenwachstum ist. Dies wird auch aus der vorliegenden Endbonitur (Tabelle 1) deutlich, da für den Versuch lediglich die Tages- und Morgentemperaturen differenziert wurden, nicht aber die Nachttemperatur.

Desweiteren weist Reinders (2008) darauf hin, dass die 24h-Mitteltemperatur entscheidenden Einfluss auf das Brakteenwachstum hat (siehe 4.3). Auch in Bezug auf die Blattfläche wirkt sich die erhöhte Temperatur positiv aus (Horn 1996). Im dargestellten Versuch überstiegen die mittleren Werte der Blattflächen der Luxuswärmekabine die der Referenzkabine um 25% (Tabelle 1). Es zeigt sich, dass die Blätter der Luxuswärmekabine und der Referenzkabine eine gleiche Dicke haben. Setzt man den Schattenflächenzuwachs,als Indikator für den Zuwachs der gesamten Blattfläche, ins Verhältnis zur eingestrahltten Lichtmenge (je Woche), zeigt sich eine Differenz zwischen der Luxuswärme- und der Referenzkabine (Abbildung 21). Das Wachstum war demnach unter gleichen Lichtbedingungen von der Temperatur abhängig.

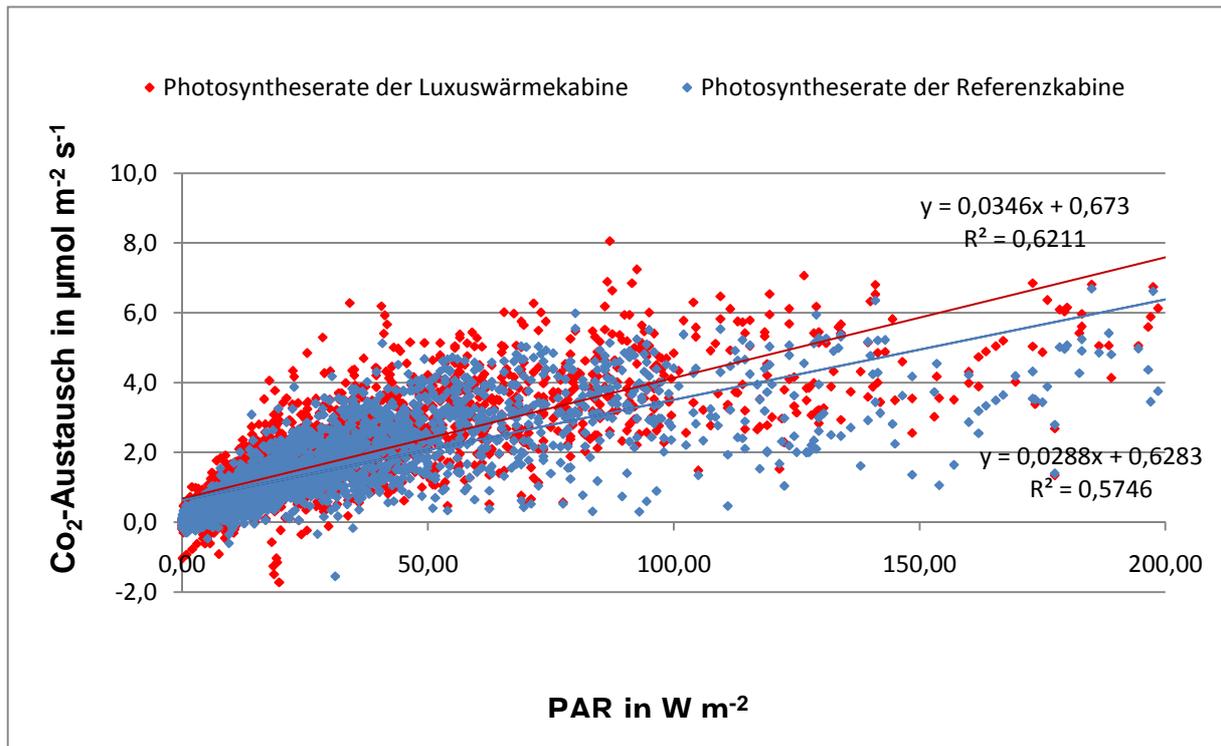


**Abbildung 21:** Zuwachsraten der Bestände im Verhältnis zur Lichtmenge.

Die Überschneidung der Trendlinien ergibt sich aus den mit der Temperatur differierenden Lichtkompensationspunkten. Horn (1996) gibt unter anderem als Erfahrungswerte Bestrahlungsstärken von  $9,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (bei  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und  $7,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (bei  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ ) für *E. pulcherrima* an. Im dargestellten Versuch zeigte sich, dass bei Belichtung unterhalb des von Horn (1996) für  $24 \text{ }^\circ\text{C}$  angegebenen Lichtkompensationspunktes die Pflanzen der Referenzkabine eine mittlere Atmungsrate von nur  $0,04 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , während die Pflanzen der Luxuswärmekabine noch  $0,11 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  veratmeten. Oberhalb dieser Grenze zeigte der Bestand der Luxuswärmekabine eine um 15% ( $0,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) erhöhte Photosyntheserate.

Eine höhere Photosyntheserate in der Luxuswärmekabine ist der Grund für eine höhere Biomasse. Ein Großteil dieser zusätzlichen Assimilate wurde in den Stängeln gebunden. Das wird durch eine höhere Trockenmasse sowie die relative Stängeltrockenmasse (+10%) belegt.

Der Leaf-Area-Index (LAI) bezieht sich auf die photosynthetisch aktive Fläche pro Standflächeneinheit. Der Vorsprung des LAI in der Luxuswärmekabine von circa 25% bedeutet daher eine 25% höhere Produktivität dieses Bestandes gegenüber der Referenzkabine. In der Anzahl der Seitentriebe gibt es keine Differenz zwischen beiden Temperaturstrategien. Das kann durch die Abhängigkeit der Seitentriebbildung von der Lichtintensität erklärt werden. Strahlungsreiche Langtage fördern die Seitentriebbildung und die Blattzahl, strahlungsreiche Kurztage die Brakteenentwicklung (Horn 1996).



**Abbildung 22:** Photosyntheserate von *Euphorbia pulcherrima*

#### 4.1.3 Blühverhalten

Der Bestand der Referenzkabine erlangte die Marktreife nicht. Zur Überwachung der Reife der Pflanzen arbeitete Reinders (2008) mit einer ähnlichen Erfassungsmethode wie im dargestellten Versuch (Schattenprojektionen), allerdings zählte er die „gefärbten (roten)“ Pixel auf den Digitalaufnahmen und setzte sie ins Verhältnis zur Gesamtschattenfläche, dabei mussten 85% der Gesamtanzahl „gefärbt“ sein, damit die Pflanze als marktfähig galt.

Wie beschrieben kam es in der Referenzkabine nicht zur Blüte der Pflanzen, in der Luxuswärmekabine färbten sich teilweise etwa zwei Drittel des Bestandes rot (Abbildung 8). Dies ist auf eine verzögerte Induktion der Blüte zurückzuführen. Verschiedene Quellen wie z.B. Horn (1996), Kristoffersen (1969), Dümmer (2009) geben an, dass die kritische Tageslänge zur Induktion der Blüte maßgeblich von der Temperatur abhängig ist. So sinkt die, für die Induktion benötigte Tageslänge mit steigender Temperatur (Kristoffersen 1969) von 12,5 Stunden bei 15 °C auf 11,5 Stunden bei 21 °C (Sorte „Viking“). Werden diese Werte (als Tendenz) auf die Sorte „Infinity Red“ übertragen, so hätte die Induktion der Blüten in der Referenzkabine ab Kalenderwoche 40 und in der Luxuswärmekabine ab Kalenderwoche 43 eingetreten sein müssen.

Im vorliegenden Versuch konnte aus technischen Gründen ein Störlichteinfluss durch benachbarte Versuche nicht vollständig verhindert werden. Wang et al. (2003) fand heraus, dass bereits geringe Lichtmengen von einem Lux während der Dunkelperiode ausreichen, um einen signifikanten Effekt auf die Blühinduktion, die Ausprägung der Farbe sowie die gesamte generative Entwicklung von *Euphorbia pulcherrima* zu haben. Unter 16 Stunden Dunkelphase verzögert ein Lux die Blüte von Poinsettien: 'Orion', 'Red Splendor', 'Freedom Red' and 'Peterstar Red' um 11, 20, 25, und 39 Tage.

Wählt man den Zeitpunkt der Abschottung gegen seitlichen Lichteinfall (schwarze Folie in Abbildung 8, seit 30.10.2008; Mitte Kalenderwoche 44) als Induktionsbeginn für beide Bestände, so verschiebt sich der Zeitpunkt der Blüte unter Einbeziehung einer Reaktionszeit von 8 Wochen entsprechend.

Ludolph (2008) beschreibt als Ergebnis eines Klimakammerversuches mit konstanten Temperaturen und Belichtungszeiten unter anderem, dass sich eine Induktionsverzögerung durch zu lange Belichtung nachhaltig die Ausfärbungsdauer verlängern, bzw. bei fast allen getesteten Sorten bei 24 °C (konstant) und 12,5 h Tageslänge vollständig unterbunden wurde.

Dass im vorliegenden Versuch in der Referenzkabine keine Blüte erreicht wurde, ist ein Ergebnis aus Induktionsverzögerung und zu geringen Lichtmengen während der Kurztagsphase, die durch die Normalkultur ohne Zusatzbelichtung gegeben waren. Grüneberg (2008) weist eine tägliche Lichtmenge von 90 klx h als untere Grenze für eine befriedigende Pflanzenentwicklung aus. Bei Strahlungswerten darunter kommt es zu schlecht ausgefärbten Brakteen und beeinträchtigter Entwicklung. Die Brakteen waren im blühenden Bestand nicht sortentypisch ausgefärbt und die Blüte war auch in Woche 52 nicht befriedigend. In Neustadt- Glewe dagegen erfolgte die Kultur ohne Störlicht und war Termingerech (bei 18/16 °C) marktfähig. Es waren offensichtlich genug strahlungsreiche Kurztage nach der Induktion gegeben um die Entwicklung der Brakteen nicht zu stören.

Die unterschiedliche Ausfärbung der Tische in der Luxuswärmekabine kam aufgrund unterschiedlicher mikroklimatischer Bedingungen auf den einzelnen Tischen zustande. Der Tagesmittelwert betrug für Tisch 3 am 20.01.2009 20,8 °C, für Tisch 4 21,4 °C und für Tisch 6 21,6 °C. Da nach Horn (1996) und Reinders (2008) sich eine höhere Tagesmitteltemperatur beschleunigend auf die Brakteenentwicklung auswirkt,

ist die Ursache für die unterschiedliche Ausfärbung in der unterschiedlichen Temperatur nicht nur je Kabine sondern auch je Tisch zu finden.

## **4.2 Diskussion *Pelargonium zonale***

### **4.2.1 Klimadaten**

Die Pflanzenhöhe bis zum Vegetationspunkt mit 3,48 cm zu 4,20 cm und der GI mit 14,17 zu 15,09 waren in der Luxuswärmekabine signifikant kleiner als in der Referenzkabine. Das kann auf eine Reaktion der Pflanzen auf die Cool-Morning-Behandlung zurückzuführen sein, da die Tag-Temperaturen während dieser Periode in beiden Kabinen gleich hoch waren, aufgrund der hohen Einstrahlung durch die jahreszeitlichen Veränderungen. Über die Auswirkungen der Cool Morning Strategie auf *Pelargonium zonale* kann anhand dieses Versuches wenig ausgesagt werden, da es keinen Vergleich in Form einer Luxuswärmebehandlung der Pflanzen ohne Cool-Morning gab. Es gibt in der Literatur viele Hinweise darauf, dass eine Cool-Morning-Periode zur Kompaktheit der Pflanzen trotz höherer Durchschnittstemperaturen beiträgt (Vogelezang et al 1992). Die Werte der Sorte 'Emilia' bezüglich des Längenwachstums und der Kompaktheit könnten dadurch begründet werden.

### **4.2.2 Phytomonitoring**

Die Transpirationsrate in der Luxuswärmekabine der Sorte 'Candy Rose' war kleiner oder ähnlich der Referenzkabine, obwohl die Dampfdruckdifferenz im Durchschnitt in der Luxuswärmekabine um 0,215 kPA höher war. Daraus und aus der höheren Durchschnittstemperatur müsste sich auch eine höhere Transpirationsrate ergeben. Eine Erklärung könnte sein, dass sich in der Referenzkabine häufiger als in der Luxuswärmekabine die Lüftung öffnete, um die angestrebte Temperatur von 16 °C am Tag sicherzustellen. Aufgrund dessen kam es zu einer erhöhten Luftbewegung in dieser Kabine, welche eine höhere Transpirationsrate zur Folge haben könnte.

### **4.2.3 Pflanzenwachstum**

Bei den Schattenbildmessungen zeigten die Werte der 15. und 16. KW der Sorte 'Candy Rose' in der Luxuswärmekabine eine geringere durchschnittliche Größe (633,03 cm<sup>2</sup> und 612,17 cm<sup>2</sup>) als in der 14. Kalenderwoche (652,44 cm<sup>2</sup>). Da die Pflanzen keine Blätter verloren hatten, war wahrscheinlich ein Problem bei der

Auswertung der Fotos die Ursache für diese Werte. Zur Auswertung der Daten von den Schattenbildflächenmessungen wurde ein im Fachgebiet entwickeltes Programm verwendet, welches die Anzahl der Pixel je Pflanze zählte. Dabei wurden bei Messungen der Pflanzen mit Blütenständen die Pixel der Blütenflächen zu denen des weißen Hintergrundes gezählt, aufgrund von Lichtreflektionen der Blütenblätter. Auch durch veränderte Lichtverhältnisse beim Fotografieren und veränderte Einstellungen am Programm konnte dieses Problem nicht beseitigt werden. Dadurch erschienen die Schattenbildflächen kleiner als sie tatsächlich waren.

#### 4.2.4 vegetative Pflanzenparameter

Ein Qualitätsmerkmal von Zierpflanzen ist nach Pytliniski und Krug (1989) neben den Blüten die Anzahl der Blätter. Die Pflanzen der Sorte 'Candy Rose' hatten im Mittel in der Luxuswärmekabine 33,30 Blätter im Vergleich zur Referenzkabine mit 29,03 Blättern je Pflanze (Tabelle 3). Bei den Sorten 'Sassa' und 'Emilia' war die Anzahl der Blätter in der Luxuswärmekabine kleiner. Keine signifikanten Unterschiede zeigten die Sorten 'Anthony' und 'Shocking Pink'. Die Reaktionen der Pflanzen auf eine Luxuswärmestrategie bezüglich des vegetativen Wachstums waren unterschiedlich und sortenabhängig. Es kann festgestellt werden, dass die Sorte 'Candy Rose' mit einer höheren Anzahl von Blättern, jedoch mit einer kleineren Blattfläche pro Blatt und gleichem LAI auf eine Luxuswärmestrategie reagierte. Die Trockenmasse der Blätter war jedoch in der Luxuswärmekabine geringer. Es bildete sich demnach eine höhere Anzahl von Blättern je Pflanze jedoch mit einer geringeren Größe je Blatt und einer geringeren Masse.

##### 4.2.4.1 generative Pflanzenparameter

Ein wichtiges Qualitätsmerkmal für die Bewertung von Zierpflanzen sind die Größe und die Anzahl von Blüten und Knospen zum Verkaufszeitpunkt. Bei allen fünf Sorten von *Pelargonium zonale* gab es signifikante Unterschiede zwischen den Pflanzen der Luxuswärmekabine und der Referenzkabine bezüglich der Frischmasse und der Trockenmasse der generativen Pflanzenteile (Tabelle 5 und Tabelle 6). Sie waren bei den Pflanzen in der Luxuswärmekabine signifikant größer als in der Referenzkabine. Auch war bei allen fünf untersuchten Sorten die Anzahl der Blütenstände in der Luxuswärmekabine signifikant größer als in der Referenzkabine. Daraus lässt sich ableiten, dass die Qualität der Pflanzen in der Luxuswärmekabine als höherwertig einzuschätzen ist.

Pytlinski und Krug (1989) zeigten in ihrem Versuch mit *Pelargonium zonale*, dass sich die Zeit bis zum Blühbeginn durch höhere Temperaturen mit integrierter DIF-Strategie (höhere Nachttemperaturen als Tagtemperaturen) verkürzen lässt. Bei diesem Versuch wurde keine DIF-Strategie integriert, da die Vorgaben aus dem Betrieb in Neustadt-Glewe eingehalten werden sollten. Es zeigte sich auch im vorliegenden Versuch, dass aufgrund höherer Durchschnittstemperaturen (18,8 °C im Vergleich zu 16,6 °C während des ersten Versuches) die Zeit bis zum Blühbeginn unabhängig von der Sorte verkürzt werden kann (Abbildung 19, Abbildung 20).

Auch Vogelesang (2000) beschreibt in seinem Versuch mit *Pelargonium zonale*, *Fuchsia x hybrida* und *Salvia splendens*, dass durch eine höhere Durchschnittstemperatur in Verbindung mit einer hohen Einstrahlung die Blütenbildung oder die Anzahl von Seitentrieben begünstigt wird. Die durchschnittliche PAR-Strahlung stieg aufgrund jahreszeitlicher Veränderungen von 84,49  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  auf 247,95  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (im 24-h-Durchschnitt) während des ersten Versuchszeitraums. Während des zweiten Versuches erhöhte sich die PAR-Strahlung (im 24-h-Durchschnitt) von 247,95  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  auf 260,28  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . In beiden Versuchen hatte die höhere Temperaturführung eine positive Auswirkung auf die Blütenbildung. Das zeigt, dass bei der Translokation der Assimilate bei *Pelargonium zonale* die „sink“-Orte der Blütenbildung durch eine höhere Temperaturführung bevorzugt werden. Die Bildung von Blüten hat durch eine höhere Durchschnittstemperatur vor dem Wachstum der vegetativen Pflanzenteile wie Blätter, Stängel oder Seitentriebe Vorrang.

Vergleicht man die fünf Sorten bezüglich ihrer Gesamtfrischmassen und -trockenmassen miteinander, kann man feststellen, dass die Luxuswärmerversorgung auf vier Sorten positive Auswirkungen hatte. Die durchschnittlichen Frischmassen der Pflanzen von 'Anthony', 'Candy Rose', 'Sassa' und 'Shocking Pink' waren in der Luxuswärmekabine höher. Auch die Trockenmassen von 'Anthony', 'Sassa' und 'Shocking Pink' zeigten in der Luxuswärmekabine höhere Werte. Die Gesamtmassen wurden aus den Tabellen 2 und 4 für den ersten Versuch und Tabellen 3 und 5 für den zweiten Versuch berechnet. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Pflanzen aufgrund höherer Photosyntheseaktivität mehr Assimilate bilden und speichern konnten. Auch Nicotra et al. (2007) schreibt, dass Pflanzen, die aus wärmeren trockenen Klimazonen stammen, bei höheren Temperaturen maximale Photosyntheseraten erreichen.

#### 4.2.5 Vergleich mit *Euphorbia pulcherrima*

Der Versuch mit dem Thema „Analyse und Bewertung des Wachstums und der Entwicklung von *Euphorbia pulcherrima* unter differenzierten Temperaturbedingungen“ (Weidemann, Kittel 2009) untersuchte ebenfalls die Auswirkungen einer Luxuswärmestrategie anhand des Zierpflanzenbetriebes in Neustadt-Glewe. Im Gegensatz zu dem Versuch mit *Pelargonium zonale* wurde bei den Euphorbien das Wachstum der vegetativen Pflanzenteile durch eine Luxuswärmestrategie bevorzugt. Die Pelargonien reagierten mit einer erhöhten Blütenbildung bei allen untersuchten Sorten, wohingegen die Rotfärbung der Brakteen der Euphorbien nur teilweise vorhanden war und die Vermarktungsfähigkeit der Pflanzen dadurch eingeschränkt war. Euphorbien sind im Gegensatz zu *Pelargonium zonale* bezüglich ihrer Blütenbildung von der Strahlungsdauer abhängig. Der LAI war bei den Euphorbien in der Luxuswärmekabine um 26% höher als in der Referenzkabine. Im Versuch mit den Pelargonien gab es einen Unterschied von 5 % im Durchschnitt der Sorten des ersten Versuchszeitraums. Das bedeutet, dass es bei beiden Versuchen eine höhere Produktivität bezüglich der Photosynthese in der Luxuswärmekabine gab.

## 5 Zusammenfassung

Das Ziel der Versuche war es, die Auswirkungen einer Luxuswärmestrategie auf *Euphorbia pulcherrima* und *Pelargonium zonale* zu untersuchen. Außerdem sollten im Versuch Veränderungen in der Qualität der Pflanzen oder eine mögliche Kulturdauerverkürzung berücksichtigt werden.

Die Euphorbien reagierten auf die Luxuswärmeversorgung mit einer größeren Pflanzenhöhe und höheren Trockenmassen. Auch die Schattenflächen und die Flächenzuwachsrate gemessen mit der Schattenflächenprojektion waren in der Luxuswärmekabine größer als in der Referenzkabine. Es wurden unter Luxuswärmebedingungen Pflanzen mit einer besseren, verkaufsfördernden Qualität produziert. Die verzögerte Rotfärbung der Brakteen ist auf andere Ursachen als die Temperaturführung zurückzuführen. Die Assimilatbildung war in der Luxuswärmekabine deutlich erhöht. Durch erhöhte Einlagerung von Reservestoffen konnte die Pflanze stärkere Triebe bilden und die Nacherntephysiologie wurde außerdem deutlich verbessert. Durch eine geeignete Sortenwahl können Vorteile in der Kultivierung durch Luxuswärme gegenüber konventionellen Anbaumethoden entstehen, jedoch sollte die Tauglichkeit der jeweiligen Sorte getestet und Kulturmaßnahmen entsprechend angepasst werden.

Bei *Pelargonium zonale* wurde die Qualität im Hinblick auf die generativen Pflanzenteile durch eine Luxuswärmeversorgung begünstigt. Es kann aufgrund der Ergebnisse davon ausgegangen werden, dass mit einer Luxuswärmestrategie eine deutliche Kulturdauerverkürzung zu erzielen ist. Die Auswirkungen auf die generativen Pflanzenteile waren bei allen Sorten positiv. Die Pflanzen zeigten bezüglich der vegetativen Pflanzenmerkmale nur bei einer Sorte positive Auswirkungen. Somit kam es bei den anderen Sorten innerhalb der Pflanzen zur Konkurrenz um gebildete Assimilate zwischen den vegetativen und generativen Pflanzenteilen. Durch eine Luxuswärmeversorgung wurde die Blütenbildung gefördert und die Entwicklung der vegetativen Pflanzenteile wurde zweitrangig.

Hinsichtlich der Kosteneffizienz für Gärtnereibetriebe und Verbesserung des Umweltschutzes wird es in Zukunft von enormer Bedeutung sein, die Aufzucht von

---

Pflanzen auf einem niedrigen Energieniveau zu ermöglichen. In Ausnahmefällen kann es jedoch effizienter sein, vorhandene Restwärme als Heizenergie für den Pflanzenanbau zu nutzen und somit zur Produktivitätssteigerung des Unternehmens beizutragen. Diese Versuchsreihe hat gezeigt, dass die Pflanzenqualität durch eine Erhöhung der Temperatur innerhalb des Optimalbereiches erhöht und die Kulturdauer verkürzt werden kann. Die Sorten und auch die Kulturmaßnahmen müssen an diese Luxuswärmestrategie angepasst sein. Weiterführende Untersuchungen an anderen Kulturen sind erforderlich, um auch eine ökonomische Abschätzung dieser neuen Produktionsstrategie vornehmen zu können.

## **6 Danksagung**

Wir danken den Herren Pfeifer, Wettstein und Huber für die Bereitstellung von Daten und Formatvorlagen, sowie für ihre Offenheit und Unterstützung.

## 7 Literatur

- Erbas, K., Seibt, A., Hoth, P., Huenges, E., 1999: Evaluierung geowissenschaftlicher und wirtschaftlicher Bedingungen für die Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen. Scientific Technical Report 99/09, 69 Seiten. Geoforschungszentrum Potsdam. Abschlußbericht zum BMBF-Projekt BEO 0326969, <http://bib.gfz-potsdam.de/pub/str9909/9909.pdf>.
- Fink, M., 2009: Exkurs: Auswirkungen des Klimawandels auf den Produktionsgartenbau. In: Status quo und Perspektiven des deutschen Produktionsgartenbau. Walter Dirksmeyer (Hrsg.), Landbauforschung – Sonderheft 330, 131-136.
- Gruda, N., Rau, B., and Wright, R.D., 2009: Laboratory bioassay and greenhouse evaluation of a pine tree substrate used as a container substrate. *Europ. J. Hort. Sci.* 74(1): 73–78.
- Gruda, N., Ruhm, G., Bokelmann, W., und Schmidt, U., 2008: Die Auswirkung von Heizölpreissteigerungen auf sächsische Gartenbauunternehmen. Teil I Ausgangs- und Energiesituation der Unterglasbetriebe. *Berichte über Landwirtschaft* 87(1), 87-105.
- Hallmann, J.; Quadt-Hallmann, A.; Tiedemann, A. v., 2007: 5.2 Morphologie und Lebensweise von Pilzen. *Phytomedizin Grundwissen Bachelor*, 67.
- Hanselmann, E., 2008: „Trau keinem Menschen, der Pelargonien nicht liebt!“, *Das Magazin für Zierpflanzenbau* (9): 24-25.
- Hell, B. T., 2004: Dunkellaubige Weihnachtssterne für Hochstämmchen. *Der Gartenbau* 2007(50), 6-9.
- Hendriks, L., 1993: Hemmstoffbehandlung von Poinsettien. *Zierpflanzenbau* 33, 646-650.
- Horn, W., 1996: *Pelargonium peltatum* und *Pelargonium zonale*. Zierpflanzenbau, Blackwell Wissenschafts-Verlag: 335-347.
- Horn, W., 1996: Wachstumsfaktoren: Temperatur, Blackwell Wissenschafts- Verlag: 116-126.
- Horn, W., 1996: *Zierpflanzenbau*. Blackswell Wissenschafts-Verlag, Berlin-Wien.
- Kristoffersen, T., 1969: Influence of daylength and temperature on growth and development in *Poinsettia*. *Acta Hortic.* 14, 73-89.
- Ludolph, D., 2008 Poinsettien-Sorten für die Kühlkultur geprüft. *Gärtnerbörse Das Magazin für Zierpflanzenbau* 2008 (04), 20-25.
- Moe, R., Myster, J., 1995: Effect of diurnal temperature alternations on plants morphology in some greenhouse crops, *Scientia Hort.* 62: 205-21.

- Moe, R.; Fjeld, T.; Mortensen, L. M., 1992: Stem elongation and keeping quality in poinsettia (*Euphorbia pulcherrima* Willd.) as affected by temperature and supplementary lighting. *Scientia Horticulturae* 50, 127-136.
- Myster, J.; Moe, R., 1995: Effect of diurnal temperature alternations on plant morphology in some greenhouse crops – a mini review. *Scientia Horticulturae* 62, 205-215.
- Nicotra, A.B., Cosgrove, M.J., Cowling, A., Schlichting, C.D., Jones, C.S., 2007: Leaf shape linked to photosynthetic rates and temperature optima in South African *Pelargonium* species.
- Niehues, R., 2008: „Die Pelargonien erzielen weiter höchsten Umsatz“, *Das Magazin für Zierpflanzenbau* (9), 10-11.
- Niehues, R., 2008: Das Alpenveilchen überholt den Weihnachtsstern. *Gärtnerbörse Das Magazin für Zierpflanzenbau* 2008 (04), 12-13.
- PTM-48M Photosynthesis Monitor 2004: Operating Instructions, V.1.1 Sep. 2004, 24.
- Pytlinski, J. und Krug, H., 1989: Modelling pelargonium zonale response to various day and night temperatures, *Acta Horticulturae* 248: 75-84.
- Reinders, U., 2008: Cultivating poinsettia at low temperatures. *FlowerTech* 11(8), 22-24.
- Röber, R. 1994: Topfkulturpflanzen. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 454-467.
- Ruhm, G., Bokelmann, W., Gruda ,N., und Schmidt, U., 2009: Die Auswirkung von Heizölpreissteigerungen auf sächsische Gartenbauunternehmen. II Maßnahmen zur Energiekosteneinsparung der Unterglasbetriebe. *Berichte über Landwirtschaft* 87(2), 246-265.
- Ruhm, G., Gruda, N., Steinborn, P., Hattermann, H., Bokelmann, W., Schmidt, U., 2007: „Energiekonzepte für den Gartenbau “. Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden, Schriftenreihe 20, 203 Seiten. [www.smul.sachsen.de/lfl/publikationen/download/3121\\_1.pdf](http://www.smul.sachsen.de/lfl/publikationen/download/3121_1.pdf)
- Ton, Y.; Kleimann, E., 2008: Advantages of the continuous around the clock monitoring of the leaf CO<sub>2</sub> exchange in plant research and in crop growing, im Press.
- Ton, Y.; Kopyt, M.; Nilov, N., 2004: Phytomonitoring Technique for Tuning Irrigation of Vineyards, *Acta Hort.* 646: S.133-139
- Ton, Y.; Nilov, N.; Kopyt, M., 2001: Phytomonitoring: the New Information Technology for Improving Crop Production, *Acta Hort.* 562: S. 257-262
- Vogelezang, J., 2000: Improvement of plant quality by integrated control of light, temperature and DIF-strategy, *ISHS, Acta Hort.* 515, 83-90.
- Vogelezang, J., Moe, R., Schüssler, H., Hendriks, L., Cuijpers, L., 1992: Cooperative european research on temperature strategies for bedding plants, *Acta Hort.* 327, 11-16.

- Wang, N., Barrett, J.E., Bartuska, C., Nell, T.A., Schoellhorn R.K. and. Hamilton, P. E., 2003: Effects of low light levels during the dark period on flower development in *Euphorbia pulcherrima*. *Acta Hort.* 624:185-190.
- Wartenberg, S., 2006: Außentemperaturkorrektur: Heizungssteuerungsstrategien zur Energieeinsparung in Gewächshäusern.  
<http://www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl>, 2006.
- Wartenberg, S., und Dallmann, M.; 2007: Erhebliche Einsparungen von Heizenergie durch dynamische Außentemperatur- und Lichtkorrektur bei Poinsettien im Herbst 2007. *Versuche im Deutschen Gartenbau*.
- Weidemann, S. und Kittel, S., 2009: Analyse und Bewertung des Wachstums und der Entwicklung von *Euphorbia pulcherrima* unter differenzierten Temperaturbedingungen. Projektarbeit, Humboldt Universität.
- Wyss, C., 2001: Weltleader in Sachen Poinsettien- Stecklinge, *Der Gartenbau* 2001(36), 6-8.

**Internet (Stand 26.05.2009)**

- Erdwärme-Kraft GbR, 2008: [www.erdwaerme-kraft.de](http://www.erdwaerme-kraft.de)
- Ming, L., 2000: Phytoplasma Casts a Magic Spell that Turns the Fair Poinsettia into a Christmas Showpiece. [www.Apsnet.org](http://www.Apsnet.org) Plant Health Reviews - 14 September 2000
- Dümmen, 2009: [www.redfox.de](http://www.redfox.de)

---

## 8 Eigene Veröffentlichungen zum Thema

- Gottschalk, S. , Gruda, N. , Schmidt, U., 2010. Untersuchungen über die Auswirkungen einer Luxuswärmestrategie auf das Wachstum und die Entwicklung von *Pelargonium zonale*. Poster, 46. Gartenbauwissenschaftliche Tagung der DGG und BHGL, 24. bis 27. Februar 2010, Stuttgart. BHGL-Schriftenreihe, Band 27, 126.
- Gruda, N. und Schmidt, U., 2008: Nutzung der Restwärme einer Geothermie-Anlage zur CO<sub>2</sub>-neutralen Beheizung eines Gewächshauskomplexes. Tag der offenen Tür, Gewächshauskomplex Ludwigslust und Neustadt-Glewe 04.10.2008, MV.
- Gruda, N., Schmidt, U., Meyer, J., Pietzsch, M., 2009: Untersuchungen zu alternativen Wärmeversorgungskonzepten für die Nutzung von Wärme aus einer Geothermie-Anlage. Poster, 45. Gartenbauwissenschaftliche Tagung der DGG und BHGL, 25. bis 28. Februar 2009, Berlin. BHGL-Schriftenreihe, Band 26, 123.
- Gruda, N., Schmidt, U., Pietzsch, M., and Meyer, J., 2009: The cultivation of poinsettias in high temperature regimes using luxury heat. GreenSys 2009. June 14 to 19, 2009 – Quebec, Canada .Acta Hort.