

Praxisorientierte Blatttemperaturmessung in beheizten Gewächshäusern

Thomas Rath¹ und Sabine Masemann²

¹ Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover

² Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau der Landwirtschaftskammer Hannover

Der Einsatz unterschiedlicher Verfahren zur Blatttemperaturmessung in Gewächshäusern wurde innerhalb eines praxisnahen Versuches mit Zierrpflanzen untersucht. Es wurden Messungen mit Anlegefühlern, Einstichfühlern, Infrarot-Punktsensoren und einem Infrarot-Kamerasystem sowohl in einem konventionellen Gewächshaus mit Rohrheizungssystem als auch in einem Gewächshaus mit einem speziellen Strahlungsheizungssystem durchgeführt und verglichen. Die sehr große Bedeutung der Blatttemperaturverteilung im Gewächshaus (besonders beim Einsatz von Strahlungsheizsystemen) und die Einsetzbarkeit von Einstichtemperaturmessfühlern zur Klimaregelung konnte gezeigt werden. Der Einsatz von Infrarot-Punktsensoren erwies sich als schwierig, prinzipiell aber möglich. Im Gegensatz dazu erbrachte die Temperaturmessung mit einem Infrarot-Kamerasystem keine zufriedenstellenden Ergebnisse.

Schlüsselwörter

Gewächshausklimatisierung, Temperaturmessung, Blatttemperatur

Einleitung und Zielsetzung

Die Pflanzenproduktion in Gewächshäusern setzt eine optimale Wärme-, Wasser- und Nährstoffversorgung voraus. Bisherige Produktionssysteme regeln dabei die Heizung und Lüftung nach der Lufttemperatur, die mit strahlungsgeschützten und ventilierten Temperaturfühlern gemessen wird oder gemessen werden sollten. Unterschiedliche Regelungskonzepte und -ansätze kommen zum Einsatz (vgl. Forschungsanstalt Geisenheim [1]). Eine über die Lufttemperatur hinaus gehende Temperaturerfassung kommt in der Praxis so gut wie nicht zum Einsatz. Demgegenüber wurde schon 1964 die Blatttemperatur als wichtige Zustandsgröße in Gewächshäusern erkannt. Sie ist für die biochemischen Reaktionen – insbesondere Photosynthese – bedeutsam. Sie ist eine Messgröße, die die thermodynamischen Randbedingungen des Produktionssystems gut widerspiegelt (Mellor et al. [2]). Mackrodt [3] kam bereits 1974 nach Blatttemperaturmessungen in Gewächshäusern zum dem Schluss, dass „bei der Klimatisierung von Gewächshäusern die Blatttemperaturen berücksichtigt werden müssen“. Weitere Arbeiten wie z.B. Amssen [4] folgten. Untersuchungen zur Messgenauigkeit und Hinweise zur Problematik bei Blatttemperaturmessungen beschreiben Tarnopolsky und Seginer [5].

Andere Untersuchungen versuchten durch die Erfassung der emittierten Strahlung im langwelligen Spektralbereich auf die Bestandes- oder Produkttemperatur zu schließen (siehe z.B. Amiro et al. [6], Linke et al. [7]). Allgemein wird dabei auf die Schwierigkeit der Sensorkalibrierung und die aufwendige Bestimmung der Emissionskoeffizienten hingewiesen (z.B. Sugita et al. [8] oder Meyer et al. [9]). Weitergehende Ansätze versuchen Blatttemperatur, Lufttemperatur und Wasserdampfdruck der Luft in die Klimaregelungskonzepte zu integrieren (z.B. Schmidt [10] oder Zolnier et al. [11]). Besonders wird nach geeigneten Miniatursensoren gesucht bzw. werden verfügbare Entwicklungen getestet (siehe z.B. Bugbee et al. [12]). Trotz dieser Ergebnisse erfolgte der Einsatz von Blatttemperaturmessungen in Produktionsgewächshäusern bisher aus folgenden Gründen nicht:

1. Messtechnische Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Blatttemperatur
2. Fehlende Sollwertvorgaben für Kulturen
3. Fehlende Informationen über die räumlichen Temperaturverteilungen

Das Wiederaufkommen von strahlungsorientierten Heizungssystemen auch im Gewächshausbereich (siehe Rath und Masemann [13]) hat die Frage nach optimalen Regelungsgrößen wieder aufkommen

lassen. Besonders durch den immensen Strahlungsanteil, der unmittelbar die Pflanzen und sonstige Oberflächen und weniger die Gewächshausluft beeinflusst, wird zur Zeit nach Alternativen zum Einsatz der Lufttemperatur als Regelgröße gesucht.

Der folgende Artikel greift diesen Sachverhalt auf und zeigt mit Hilfe eines praxisnahen Versuchsaufbaues die Möglichkeiten von Blatttemperaturmessungen zur Heizungsregelung von Gewächshäusern - speziell mit einem Heizungssystem mit einem hohen Strahlungsanteil - auf.

Material und Methoden

Messverfahren

An der Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau, Hannover-Ahlem wurden in der Zeit vom 21.12.2001 bis 26.2.2002 verschiedene Topfpflanzen (Begonia Elatior-Gruppe 'Dark Britt' und Impatiens Neu-Guinea-Gruppe 'Riviera Fire') in zwei unterschiedlich beheizten, ansonsten aber gleich ausgestatteten Gewächshäusern (Gewächshausfläche 12,20 m x 9,20 m, Stehwandhöhe 3,20 m, Kulturfläche 11,0 m x 7,4 m) kultiviert. Die Gewächshäuser waren mit Rinnentischen (5 Stück pro Haus) und herkömmlicher Fließbewässerung ausgestattet. Sie waren mit Einfachglas eingedeckt und in Traufenhöhe war ein Energieschirm (aluminisiertes Bändchengewebe, nachts geschlossen) installiert.

In einem Haus erfolgte die Heizenergiezufuhr mit zwei, unterhalb der Energieschirme quer zum First verlaufenden Dunkelstrahlerrohren (pro Rohr je ein Brenner mit 28 kW Maximalleistung, erdgasbetrieben, am nördlichen Rohrfang in das Rohr integriert). Die Strahlungsrohre befanden sich im Abstand von 1,60 m zur Pflanzenebene, waren jeweils 9 m lang und in einem Abstand von 3,10 m angeordnet und nach oben durch ein Blech abgeschirmt. Das System wird im folgenden immer als Strahlungsheizung bzw. Strahlungsheizungshaus bezeichnet. In dem anderen Haus war eine konventionelle Untertischrohrheizung, gekoppelt mit einer Stehwandrohrheizung

installiert (Bezeichnung Rohrheizung bzw. Rohrheizungshaus).

Während der gesamten Versuchsdauer wurden in beiden Häusern Messungen der Blatt-, Luft- und Bodentemperaturen, der Luftfeuchten sowie vergleichende Energiemessungen durchgeführt.

Die Messung der Lufttemperaturen erfolgte mit 9 strahlungsgeschützten und ventilerten Psychrometern (trockene Temperatur). Zur Messung der räumlichen Verteilung der Blattoberflächentemperaturen kamen in jedem Haus 9 Anlegefühler zum Einsatz, die an der Blattunterseite der Laubblätter angebracht waren. Es handelte sich um Konstruktionen, bei denen 0,1 mm starker Thermodraht (NiCr-Ni Typ K) (Heraeus [14]) in Kunststoffhalterungen gespannt war (siehe **Bild 1**). Die Thermolemente mussten im Durchschnitt aufgrund des Pflanzenwachstums 2 mal die Woche kontrolliert bzw. justiert werden.

Die Regelung der Heizungssysteme erfolgte mit Hilfe von Einstichfühlern (2 Fühler pro Haus), die in der Mitte der Häuser an zwei unterschiedlichen Pflanzen positioniert waren. Es handelte sich dabei um Mantelthermoelemente mit einem Durchmesser von 0,25 mm, NiCr-Ni (Typ K) und einer Nennlänge von 100 mm (TMH [15]). Die Einstichfühler wurden in die Blattspreite in vorher gestochene Löcher ca. 3 cm eingeführt (siehe Bild 1). Trotz des Pflanzenwachstums konnten die Einstichfühler lange Zeit in den Pflanzen belassen werden, wobei nach ca. einem Monat neue Blätter als Messorte verwendet wurden.

Zusätzlich wurde der Pflanzenbestand an drei Terminen mit Hilfe thermografischer Verfahren vermessen. Zum einen kam dabei ein Infrarot-Strahlungsthermometer (spektrale Empfindlichkeit 8000 – 20000 nm) zum Einsatz (Heimann [16]). Mit Hilfe des Sensors wurde manuell an 50 verschiedenen Positionen in jedem der beiden Gewächshäuser die Temperatur der oberen Pflanzenpartien gemessen (senkrechte Messaufnahme über der Mitte der Pflanze, Abstand Pflanze-Sensor ca. 15 cm). Die Umrechnung auf die Objekttemperatur erfolgte anhand einer vorher im Labor ermittelten Kalibrierungsfunktion. Es wurde nur innerhalb von Messzyklen gemessen, bei denen aufgrund der Regelung die Brenner der Dunkelstrahler ausgeschaltet waren.

Zum anderen wurde der Pflanzenbestand thermografisch mit einer Thermografiekamera mit einem Messfenster zwischen 2000 – 5000 nm vermessen (Jenoptik [17]). Die Messungen erfolgten bei laufendem Heizbetrieb bei geöffnetem oder geschlossenem Energieschirm, je-

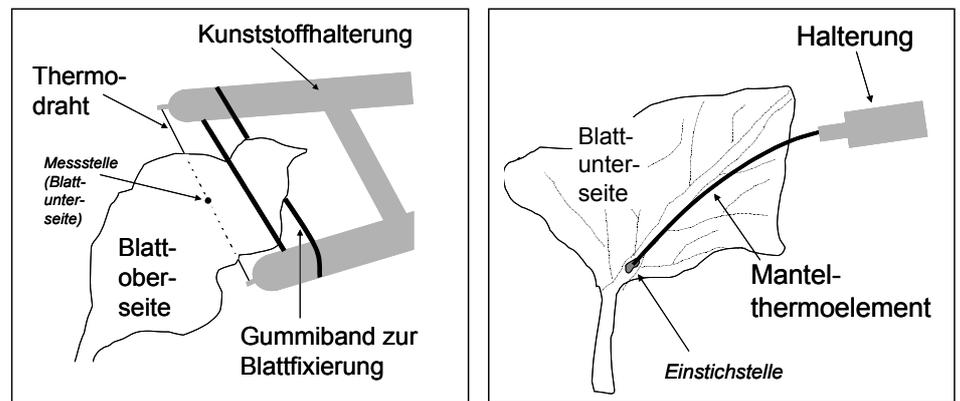


Bild 1: Prinzipskizze der Blatttemperaturmessung mit Anlegefühler (links) und Einstichfühler rechts)

weils von oben schräg auf die Kultur. Zur Reduzierung des reflektierenden Strahlungseinfalls der Dunkelstrahler wurden die Strahlerrohre während der Thermografieaufnahmen abgeschirmt. Bei der Umrechnung der Strahlungsemissionen in Temperaturwerte wurde von einer Umgebungstemperatur von 15 °C und einem Emissionskoeffizienten für langwellige Strahlung von 0,992 (angegeben von Monteith [18] für Geranien) ausgegangen (zur Umrechnung siehe auch Schuster und Kolobrodov [19]).

Heizungsregelung

Ziel der Regelung war es, in beiden Häusern identische und damit vergleichbare Wachstumsbedingungen zur Verfügung zu stellen. Die Klimaregelung im Rohrheizungshaus erfolgte dabei über einen Klimacomputer auf der Basis der gemessenen Lufttemperatur in Hausmitte (Sollwerte während der Versuchsdurchführung 20 °C am Tag und 18 ° in der Nacht). Die Schaltzeitpunkte für das Strahlungsheizungshaus wurden mit Hilfe des Vergleiches der Blatttemperaturwerte der beiden Häuser ermittelt (Zwei-Punkt-Regelung). War der Temperaturmittelwert der beiden Fühler des Dunkelstrahlerhauses mehr als 1 K niedriger als der Temperaturmittel-

wert der beiden Fühler des Rohrheizungshaus, wurde die Dunkelstrahlerheizung angeschaltet (Brenner an). Lag sie mehr als 0,5 K über dem Mittelwert des Rohrheizungshaus, wurde die Strahlungsheizung ausgeschaltet (Brenner aus). Die Lüftungsregelung des Dunkelstrahlerhauses wurde direkt mit der Lüftungsregelung des Rohrheizungshaus gekoppelt. Die Realisierung des Regelkonzeptes erfolgte mit Hilfe des am Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft der Universität Hannover entwickelten Mess- und Regelsystems (Tantau [20]).

Aufzeichnungszyklen

Bild 2 gibt exemplarisch die durch das beschriebene Regelungsprinzip entstehenden Schwankungen der Rohrtemperaturen des Strahlungsheizungssystems wider. Die beiden oberen Kurven stellen die Strahlrohrtemperaturen am Rohrfang, die unteren Kurven am Rohrende bei unterschiedlichen Aufzeichnungszyklen dar. Werden die Messdaten alle drei Minuten aufgezeichnet, erkennt man deutlich die Zwei-Punkt-Charakteristik der implementierten Regelung. Die Strahlrohrtemperaturen schwankten in diesem Fall aufgrund des An- und Ausschaltens der Brenner zwischen 60 °C und 200 °C.

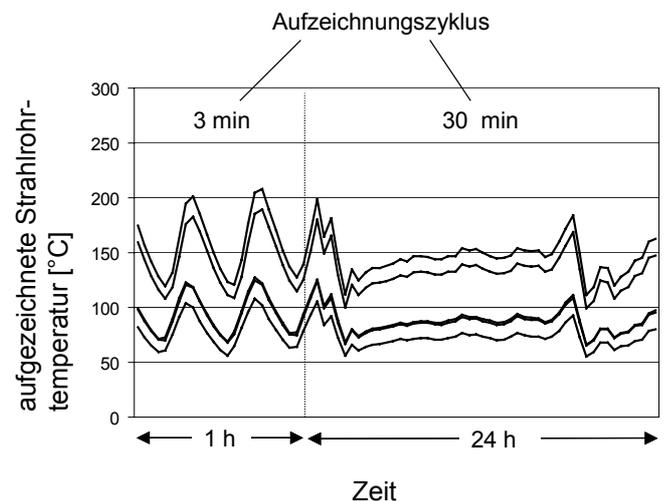


Bild 2: Einfluss des Aufzeichnungszyklus auf die Strahlrohrtemperaturanalyse

Werden die Messdaten nur alle 30 Minuten als Mittelwerte aufgezeichnet, erkennt man die direkten Regelungsschwingungen nicht mehr, da sich die Aufzeichnungszyklen mit den Schaltzyklen der Brenner überlagern. Gleichzeitig lassen sich jedoch bessere Aussagen hinsichtlich der Temperaturverteilung innerhalb der Systeme herausarbeiten. Aus diesem Grund wurde bei der Darstellung der Temperaturverteilungsergebnisse auf 30-Minuten-Mittelwerte zurückgegriffen, da die Aussagen so unabhängiger von den kurzfristigen Schwingungen der Heizungssysteme waren.

Berechnung der Blattspreitentemperatur

Eine wichtige Größe zur Analyse der Blatttemperatur ist die in der Blattspreite herrschende Blattspreitentemperatur. Sie kann annähernd aus der Blattoberflächentemperatur abgeschätzt werden. Es müssen jedoch die thermodynamischen Randbedingungen berücksichtigt werden, da die mit einem Blattanlegefühler gemessenen Blattoberflächentemperaturen maßgeblich sowohl von den konvektiven als auch von den strahlungsbasierten Wärmeströmen abhängen. Für die weiteren Analysen wurden die Spreitentemperaturen aus den gemessenen Anlegefühlertemperaturen berechnet und zwar im Haus mit Rohrheizung durch den Modellansatz: Anlegefühlertemperatur - 0,2 K = Blattspreitentemperatur. Demgegenüber galt für das Strahlungsheizungshaus: Anlegefühlertemperatur - 0,8 K = Blattspreitentemperatur. Die Temperaturabschläge 0,2 und 0,8 ergaben sich aus den in **Tabelle 1** dargestellten gemessenen Temperaturdifferenzen zwischen Einstichfühler und Anlegefühler über den gesamten Versuchszeitraum in Hausmitte.

Auswertung der Infrarot-Bilder

Zur Interpretation der Infrarot-Bilder wurden jeweils drei Bilder zu einer Gesamtansicht einer Aufnahmeserie zusammengesetzt. Die Auswertungen erfolgten jeweils für einen nördlichen und einen südlichen Tischbereich. Sie erfolgten auf zwei unterschiedliche Arten: Zum einen wurden in jedem Bild die Temperaturwerte eines gesamten Tischbereiches (ohne Messgeräte, Störungen und Aufbauten) verrechnet. Bei dem zweiten Verfahren wurde pro Einzelbild eine repräsentative und möglichst einheitliche Fläche (ohne Strahlungsstörungen) von ca. 1 m² (10 – 20 Pflanzen) bildanalytisch markiert und für die weiteren Analysen verwendet. **Bild 3** stellt die resultierenden Bilder und Auswerteregionen dar. Eine Temperaturdifferenzierung bei der Auswertung innerhalb der markierten Regionen fand nicht statt.

Tabelle 1: Temperaturen im Rohrheizungs- und Strahlungsheizungs- (jeweils Hausmitte) während der Kulturzeit

		Mittelwert	Std.abw.	Minimum	Maximum
Lufttemperatur [°C]	Rohrheizung	19,3	1,5	16,8	27,0
	Strahlungsheizung	17,7	1,8	13,7	25,8
Blatttemperatur (Anlegefühler) [°C]	Rohrheizung	18,6	2,0	15,9	27,7
	Strahlungsheizung	19,3	2,6	14,1	29,6
Blatttemperatur (Einstichfühler) [°C]	Rohrheizung	18,4	2,2	15,2	29,3
	Strahlungsheizung	18,5	2,3	14,4	28,6

Ergebnisse

Tabelle 1 zeigt die während der Kulturzeit in Hausmitte gemessenen Temperaturen als Mittelwerte. Im Haus mit Rohrheizung liegen die Blatttemperaturen (Anlegefühler) im Durchschnitt unter den Lufttemperaturen (18,6 °C zu 19,3 °C) während sie im Gewächshaus mit Strahlungsheizung deutlich über der Lufttemperatur liegen (19,3 °C zu 17,7 °C). Wird die Blatttemperatur mit einem Einstichfühler gemessen, reduziert sich der Fehler durch den Strahlungseinfluss deutlich (18,5 °C zu 17,7 °C).

Betrachtet man die Differenzen zwischen Luft- und Blatttemperatur (Einstichfühler) für bestimmte Tagesabschnitte ge-

nauer, ergeben sich für das Rohrheizungs- haus folgende Differenzmittelwerte: 0,2 K (9:00 - 15:00 Uhr) und 1,2 K (21:00 - 3:00 Uhr). Für das Strahlungsheizungs- haus ergaben sich für die Differenz zwischen Lufttemperatur und Einstichfühlertemperatur folgende Mittelwerte: - 0,5 K (9:00 - 15:00) und - 0,6 K (21:00 - 3:00 Uhr). Das bedeutet, dass die gemessenen Temperatureffekte im Wesentlichen auf den Heizungs- und Energieschirmeinfluss zurückzuführen waren. Die am Tag evtl. auftretende Globalstrahlung war demnach während der Versuchsdurchführung von untergeordneter Rolle.

Die nahezu gleiche Blattspreitentemperatur in Hausmitte der beiden Häuser in der Tabelle 1 zeigen, dass das Regelkon-

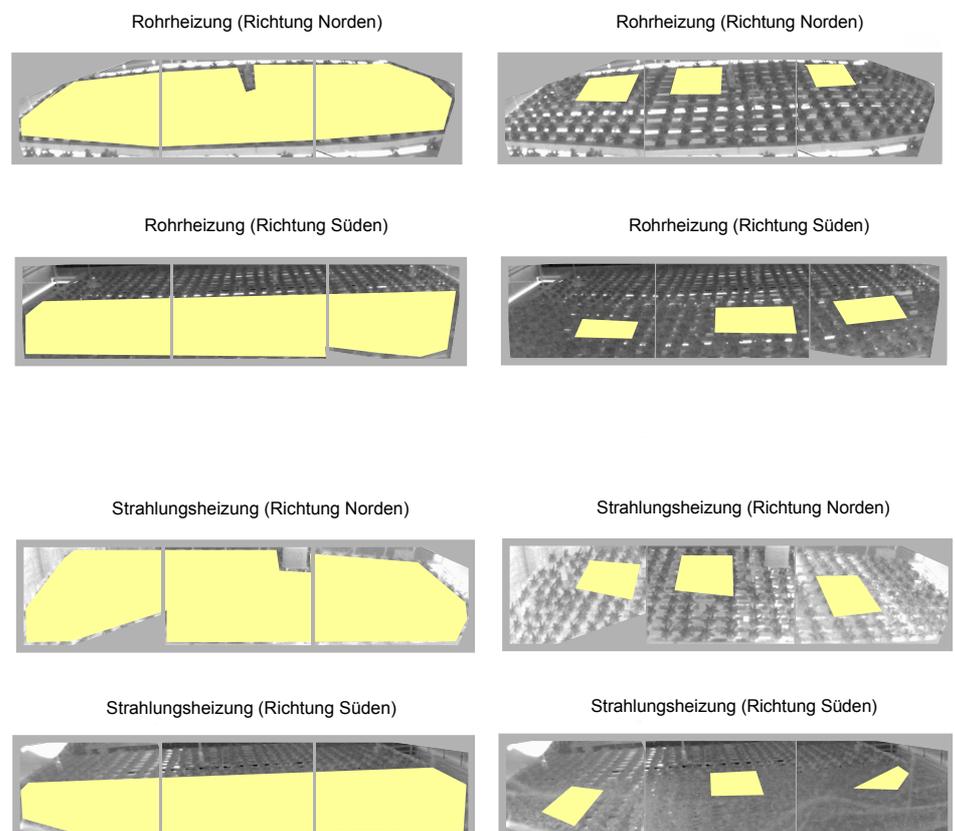


Bild 3: Zusammengesetzte Infrarotaufnahmen mit den jeweils zugrunde gelegten Auswerteregionen (links: Auswertung der Gesamtfläche, rechts: Nutzung optimaler Auswerteregionen, markiert: Auswerteregion)

zept, in beiden Häusern in Hausmitte gleiche Blattspreitentemperaturen zu halten, realisiert werden konnte. Obwohl die Standardabweichungen über die Kulturzeit relativ gering ist, sollte bei der Interpretation der Daten darauf geachtet werden, dass Schwankungen von über 15 K aufgetreten sind, selbst bei der Berücksichtigung eines 30 min. Aufzeichnungszyklusses (siehe oben).

Da neben den zeitlichen Schwankungen auch besonders die räumliche Variabilität von großer Bedeutung für die Pflanzenproduktion in Gewächshäusern ist, werden in den **Bildern 4 und 5** die durchschnittlichen Temperaturverteilungen während der Kulturperiode in den beiden Gewächshäusern dargestellt.

Es wird deutlich, dass in beiden Häusern die Lufttemperatur relativ homogen im Gewächshaus verteilt ist – jedoch auf unterschiedlichem Niveau. Im Gegensatz dazu wird beim Einsatz von Strahlungsheizungssystemen die Blattspreitentemperatur unterhalb der Strahlerrohre massiv kleinräumig beeinflusst, so dass ein ausgeprägtes Temperaturprofil im Bestand entsteht. Im Maximum wurden Lufttemperaturunterschiede im Rohrheizungshaus von 3 K und im Strahlungsheizungshaus von 4 K gemessen. Blattspreitentemperaturunterschiede ergaben sich im Maximum zu 8 K (Rohrheizungshaus) bzw. 10 K (Strahlungsheizungshaus). Bei der Interpretation besonders der Ergebnisse der Blattspreitentemperaturen im Strahlungsheizungshaus sei darauf hingewiesen, dass die großen Blattspreitentemperaturunterschiede sich nicht in dem starken Maße im Wachstumsunterschied der Kulturen widerspiegeln. Auf die wachstumsspezifischen Unterschiede zwischen verschiedenen Heizungssystemen wird hier nicht näher eingegangen. Es wird auf Ludolph und Masemann [21] verwiesen. Die Variation der Lufttemperaturen in vertikaler Richtung wurde stichprobenartig an drei verschiedenen Terminen überprüft. Es ergaben sich keine signifikanten Tendenzen.

Vergleicht man Blatttemperaturmessungen mit Anlegefühlern und Blatttemperaturmessungen mit Infrarot-Thermometern (berührungslos), ergibt sich das Ergebnis in **Tabelle 2**. Es stellt die Differenzen der beiden Messverfahren und deren Streuungen innerhalb der Gewächshäuser zu einem bestimmten Zeitpunkt dar (Messverfahren siehe Material und Methoden). Um die Fehlerquellen so gering wie möglich zu halten, wurden beim Vergleich der Messverfahren nur die 9 direkt mit Anlegefühlern gemessenen und im gesamten Bestand verteilten Pflanzen berücksichtigt.

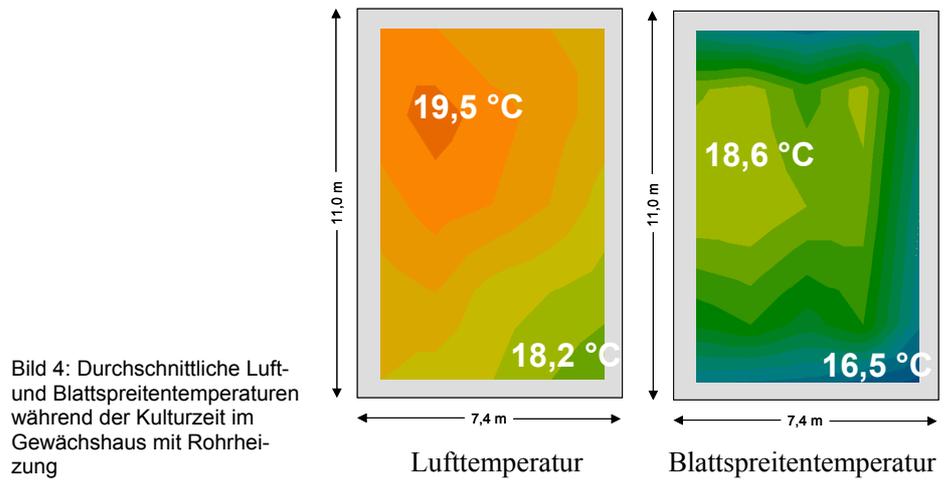


Bild 4: Durchschnittliche Luft- und Blattspreitentemperaturen während der Kulturzeit im Gewächshaus mit Rohrheizung

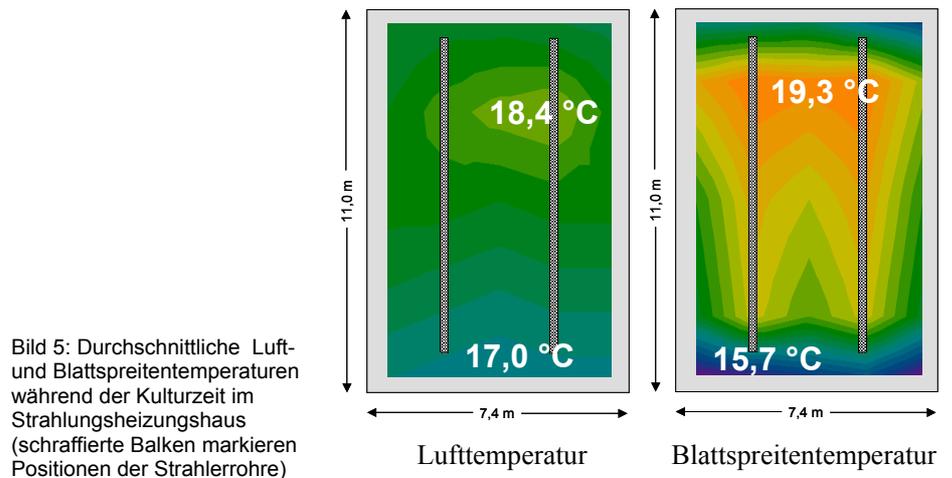


Bild 5: Durchschnittliche Luft- und Blattspreitentemperaturen während der Kulturzeit im Strahlungsheizungshaus (schraffierte Balken markieren Positionen der Strahlerrohre)

Man sieht, dass im Mittel die mit dem Infrarot-Thermometer gemessenen Blatttemperaturen um 1,1 K (Rohrheizung) und um 0,5 K im Strahlungsheizungshaus höher als die Messungen mit den Anlegefühlern waren. Wesentliche Ursache hierfür könnte sein, dass mit dem Infrarot-Thermometer die Blattoberseite gemessen wurde und bei den Anlegefühlern die Messpunkte an der Blattunterseite waren. Eventuell entstanden die Differenzen auch durch unterschiedlichen Blattkontakt der Anlegefühler oder durch unterschiedliche Emissionssituationen bei Verwendung der IR-Sensoren. Da die Streuungen auf der Fläche für beide Messverfahren ähnlich waren (siehe Zeile 3 bis 6), spricht Vieles

für einen Unterschied, der systematischen Charakter hat. Auf jeden Fall bleibt festzuhalten, dass zum Teil erhebliche Unterschiede zwischen den Messverfahren auftraten, die im Fall eines Strahlungsheizungssystems zu Messdifferenzen der Blatttemperatur von bis zu 2,6 K führten.

Um das Infrarot-Messverfahren nicht nur auf einzelne Pflanzen zu begrenzen, sondern eine praxisgerechte Bestandesmessung zu realisieren, ist es denkbar, den ganzen Bestand oder Bestandesregionen mit einem Infrarot-Flächensensor zu bewerten. **Tabelle 3** gibt die analysierten Ergebnisse der Bestandesaufnahmen mit einer Thermo-Kamera wider. Die Daten

Tabelle 2: Vergleich der Blatttemperaturmessung mit Anlegefühlern und Infrarot-Sensoren und deren Streuung im Gewächshaus

		Mittelwert	Std.abw.	Maximum
Differenz [K] (Anlegefühler minus IR-Sensor)	Rohrheizung	- 1,1	0,5	-1,6
	Strahlungsheizung	- 0,5	1,5	- 2,6
Streuung der Anlegefühler im Gewächshaus [K]	Rohrheizung	0,9	0,8	2,4
	Strahlungsheizung	1,5	0,9	3,7
Streuung der IR-Sensoren im Gewächshaus [K]	Rohrheizung	0,9	0,6	2,9
	Strahlungsheizung	1,9	1,3	5,4

Tabelle 3: Temperaturspannen innerhalb von Auswerteregionen bei der Temperaturbestimmung mit einer Infrarotkamera (Mittelwerte, Maximum oder Minimum aller ausgewerteten Bilder), Pix.temp. = berechneter Temperaturwert eines Bildpunktes

		Temp.- spanne Mittelwert [K]	Std.abw. Pix.temp. Mittelwert [K]	Temp.- spanne Minimum [K]	Temp.- Spanne Maximum [K]
gesamte Tischregion	Rohrheizung	19,2	1,7	14	24
	Strahlungsheizung	13,4	0,8	3	38
optimale Regionauswahl (10 – 20 Pflanzen)	Rohrheizung	4,6	0,65	3,8	5,5
	Strahlungsheizung	3,4	0,5	1,8	4,6

stellen die Mittelwerte über alle ausgewerteten Bilder des jeweiligen Gewächshauses dar.

Werden die gesamten Tischregionen als Messregion verwendet, ergeben sich innerhalb der Bilder durchschnittliche Temperaturspannen von 19,2 K bzw. 13,4 K pro Bild. Erstaunlicherweise sind die mittleren Unterschiede im Gewächshaus mit Rohrheizung noch größer als beim Einsatz einer Strahlungsheizung. Dieses liegt daran, dass bei der Rohrheizung z.T. auch die Heizrohre thermografisch direkt sichtbar waren und in die Datenauswertung mit eingingen. Demgegenüber waren im Strahlungsheizungshaus die Dunkelstrahler oberhalb der Kulturen angebracht und wurden während den Messungen mit Folie abgeschirmt. Bei ungünstigen Reflexionsverhältnissen traten aber trotzdem im Strahlungsheizungsgewächshaus mit 38 K die höchsten Temperaturspannen auf. Wurden die Messregionen bildanalytisch auf homogene Bereiche reduziert, verringerten sich die Spannbreiten deutlich und die Standardabweichungen der Bildpunkt(Pixel)temperaturen der einzelnen Regionen (bzw. Bilder) konnten auf 0,5 K bzw. 0,65 K reduziert werden. Die durchschnittlichen Spannbreiten innerhalb der Regionen lagen mit 3,4 K bzw. 4,6 K jedoch noch immer deutlich über einem für Regelungszwecke akzeptablen Wert. Hinzu kam die Problematik, dass eigentlich durch die Heterogenität der in einem Bild vorliegenden Objekte, für jeden Bildbereich – evtl. sogar für jedes Pixel – eine eigene Kalibrierungsfunktionen verwendet werden müsste. Die hierdurch entstehenden Differenzen zwischen Thermokameraergebnis und Blatttemperatur, gemessen mit Anlegefühlern, betrug in den Versuchen bis zu 5 K. Der Vergleich mit den Werten aus Tabelle 2 zeigt, dass die Infrarot-Kameramessungen nicht mit Punktmessungen der Blatttemperatur hinsichtlich der Anfälligkeit für Fehlinterpretationen mithalten können.

Diskussion und Schlussfolgerung

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass ein unmittelbare Überführung von Labormessmethoden zur Blatttemperaturmessung in die gartenbauliche Praxis schwierig ist. Auf der anderen Seite zeigen die Ergebnisse auch, dass besonders bei Gewächshausystemen, bei denen die Heizungsenergiezufuhr hauptsächlich in Form von Strahlung erfolgt, die Blatttemperaturen und deren räumliche Verteilung im Gewächshaus eine entscheidende Klimaführungsgröße darstellen. In diesen Situationen ist die alleinige Verwendung der Lufttemperatur als Führungsgröße unzureichend.

Anlegefühler und Einstichfühler können auch unter Praxisbedingungen zur Messung der Blatttemperatur verwendet werden. Eine funktionierende Zwei-Punkt-Regelung konnte mit Einstichfühlern realisiert werden, so dass die bisher vorherrschende „Scheu“, in der Praxis an der Pflanze direkt zu messen, unbegründet ist oder zumindest überdacht werden sollte. Der Wartungsaufwand bei der Verwendung von Anlege- oder Einstichfühlern ist jedoch zu berücksichtigen. Eine abschließende Bewertung dieses Aspektes sollte erst nach Untersuchungen an weiteren Kulturen erfolgen.

Welches Messverfahren für die Blatttemperatur in der Praxis ideal oder sogar optimal ist, hängt im Wesentlichen von den thermodynamischen Umgebungsbedingungen im Gewächshaus ab. Allgemein zeigte sich, dass mit Einstichfühlern die tatsächliche Blattspreitentemperatur gut erfasst werden kann, wohingegen Anlegefühler eine von der Lufttemperatur beeinflusste Blatttemperatur widerspiegeln. Beide Messverfahren können somit je nach bevorzugtem Heizungssystem optimal sein. In den durchgeführten Versuchen waren jedoch die Einstichfühler aufgrund der höheren Betriebssicherheit im Vorteil.

Infrarot-Punktsensoren können zur Bestimmung der Blatttemperaturen ebenso

eingesetzt werden. Der Vergleich mit anderen Blatttemperaturmessverfahren ist schwierig, da die gemessenen Temperaturen auch oder gerade hier im Wesentlichen von den Einstrahlungsbedingungen, dem Aufnahmewinkel und den richtigen Abschätzungen der Umgebungstemperaturen abhängen. Bei geeigneter Kalibrierung und exakter Messdurchführung können jedoch repräsentative Ergebnisse erzielt werden, die hinsichtlich der Verwendbarkeit mit denen von Anlege- bzw. Einstichfühlern konkurrieren.

Eine Verwendung von bildgebenden Verfahren auf Infrarot-Basis zur Temperaturabschätzung ist problematisch, da neben den Pflanzenbeständen auch reflektierende oder direkt selbst Wärme abstrahlende Gegenstände (Heizungsrohre) erfasst werden, bzw. eine Beeinflussung der Messobjekte stattfindet. Eine automatische und auf Bildanalysetechniken basierende Kalibrierung wäre prinzipiell möglich, jedoch aufgrund der komplexen Strahlungsverhältnisse im Gewächshaus sehr aufwändig, da Pflanzen wachsen und sich somit die Aufnahmepositionen und Strahlungssituationen im Bestand ständig ändern. Hinzu kommt, dass besonders bei kleineren Pflanzen in der Regel Gewächshauskonstruktions- und Inneneinrichtungsteile im Aufnahmebild deutlich werden und die Temperatur des eigentlichen Messobjektes verfälschen.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt fehlen für Praxis orientierte Anwendungen die entsprechenden Blatttemperatursollwerte. Ferner ist die Korrelation zwischen Blatttemperatur und Pflanzenwachstum bei höherem Wärmestrahlungsangebot in Gewächshausbeständen noch nicht ausreichend bekannt (siehe hierzu auch Ludolph und Masemann [21]). Eine Berücksichtigung der Blatttemperaturen in konventionellen Klimaregelstrategien erfolgte bisher nicht. Das Problem der Lüftungs- und Feuchteregeung beim Einsatz der Strahlungsheizung ist ebenfalls noch ungelöst.

Zukünftige Arbeiten sollten daher dem Aspekt der Blatttemperaturmessung in praktischen Ansätzen mehr Rechnung tragen. Es müssen Sollwerttabellen erstellt werden, die es dem Gärtner ermöglichen - ohne eigene experimentelle Untersuchungen durchzuführen - Kulturprogramme auf Blatttemperaturbasis zu realisieren. Die in dieser Arbeit vorgestellten Eckdaten können als Grundlage dienen. Es ist jedoch zu beachten, dass andere Witterungsverhältnisse, Gewächshausausstattungen oder Klimatisierungsmaßnahmen auf jeden Fall andere thermodynamische Zusammenhänge im Gewächshaus erzeugen und somit die vorgestellten Ergeb-

nisse nicht ohne weiteres auf andere Situationen übertragen werden können. Insbesondere sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse nur für den Winterheizfall gelten. Bei Sommerklimatisierung kann auf die Untersuchungen von Mackroth [3] zurückgegriffen werden. Evtl. sind auch kombinierte Ansätze notwendig, die sowohl Lufttemperatur als auch Blatttemperatur berücksichtigen. Inwieweit Blattküvetten bzw. Miniaturanlegesensoren als Messsensoren in der Praxis eingesetzt werden können, werden zukünftige Entwicklungen zeigen.

Literatur

- [1] *Forschungsanstalt Geisenheim* (1997): Temperaturregelstrategien. Thalacker-Medien, Braunschweig, D.
- [2] *Mellor, R.S.; Salisbury F.B. und K. Raschke* (1964): Leaf temperatures in controlled environments. *Planta*, 61, 56-72.
- [3] *Mackroth, K.* (1974): Die Blatttemperatur als Führungsgröße zur Regelung des Gewächshausklimas. *Gartenbauwissenschaft*, 39, 105-134.
- [4] *Amsen, M.G.* (1980): Is leaf temperature a suitable parameter for greenhouse environment control. *Acta Horticulturae*, 106, 137-138.
- [5] *Tarnopolsky, M. und I. Seginer* (1999): Leaf temperature error from heat conduction along thermocouple wires. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93 (3), 185-194.
- [6] *Amiro, B.D.; Thurtell, G.W. und T.J. Gillespie* (1983): A small infrared thermometer for measuring leaf temperature in leaf chambers. *Journal of Experimental Botany*, 34, (148), 1569-1576.
- [7] *Linke, M.; Beuche, H.; Geyer, M. und H. J. Hellebrand* (2000): Possibilities and Limits of the Use of Thermography for the Examination of Horticultural Products. *Agrartechnische Forschung*, 6, 110-114.
- [8] *Sugita, M.; Hiyama, T. und T. Ikukawa* (1996): Determination of canopy emissivity: how reliable is it? *Agricultural and Forest Meteorology*, 81 (3,4), 229-239.
- [9] *Meyer, G.E.; Fletcher, M.R. und J.B. Fitzgerald* (1994): Calibration and use of a pyroelectric thermal camera and imaging system for greenhouse infrared heating evaluation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 10, 215-227.
- [10] *Schmidt, U.* (1996): Greenhouse climate control with a combine model of greenhouse and plant by using online measurement of leaf temperature and transpiration. *Acta Horticulturae*, 406, 89 - 98.
- [11] *Zolnier, S.; Gates, R.S.; Buxton, J. und C. Mach* (2000): Psychrometric and ventilation constrains for vapor pressure deficit control. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26 (3), 343-359.
- [12] *Bugbee, B.; Monje, O. und B. Tanner* (1996): Quantifying energy and mass transfer in crop canopies: sensors for measurement of temperature and air velocity. *Advances in Space Research*, 18 (4/5), 149 - 156.
- [13] *Rath, T. und S. Masemann* (2002): Dunkelstrahler im Praxistest – Ergebnisse technischer Untersuchungen. *Das Taspo Magazin*, 5, 25 - 28.
- [14] *Heraeus* (1995): Thermoelementleitung D2KK - Produktinformation. Heraeus Sensor GmbH, Kleinostheim, D.
- [15] *TMH* (2002): Mantelthermoelement (0,25 mm) - Produktinformation. Temperatur Messelemente Hettstedt GmbH, Hanau, D.
- [16] *Heimann* (1977): Strahlungsthermometer KT 36 - Bedienungsanleitung. Heimann GmbH, Wiesbaden-Dotzheim, D.
- [17] *Jenoptik* (1999): Thermokamera Varioscan high resolution - Produktinformation. Jenoptik Laser, Optik, Systeme GmbH, Jena, D.
- [18] *Monteith, J.L.* (1973): Principles of Environmental Physics. Edward Arnold, London, GB.
- [19] *Schuster, N. und V.G. Kolobrodov* (2000): Infrarotthermographie. Wiley-VCH Verlag, Berlin, D.
- [20] *Tantau, H.J.* (2002): Das ITG – Mess- und Regelsystem. Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover.
- [21] *Ludolph, D. und S. Masemann* (2002): Dunkelstrahler im Praxistest – Ergebnisse pflanzenbaulicher Versuche. *Das Taspo Magazin*, 5, 30 - 31.

Danksagung

Für die Unterstützung zur Durchführung des Vorhabens danken wir der Avacon AG (Gasversorger) und den Firmen Systema, Broermann und Brink (Dunkelstrahlerhersteller und -installation)

Autoren

Prof. Dr. Thomas Rath
Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover
Herrenhäuser Str. 2,
30419 Hannover,
Tel.: +49/(0)511/7622659
Fax: +49/(0)511/7622649
E-mail: rath@itg.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. agr. Sabine Masemann
Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau der Landwirtschaftskammer Hannover
Heisterbergallee 12
30453 Hannover
Tel.: +49/(0)511/4005158
Fax: +49/(0)511/ 4005200
E-mail: lvg.ahlem@lawikhan.de