

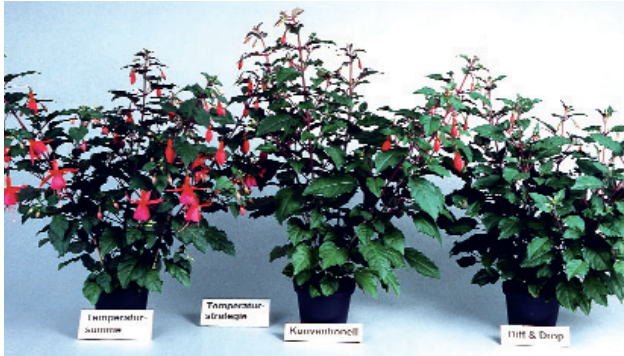


Abb. 4: Hohe Tagtemperaturen bei der Temperatursummenregelung können das Aufblühen bei Fuchsien fördern, niedrige Tagtemperaturen hemmen das Streckungswachstum (v.l.n.r.: Temperatursumme, Konventionell, DIFF & DROP)

rigen Tag- und hohen Nachttemperaturen das Streckungswachstum hemmen und umgekehrte Kombinationen (hohe Tag-/niedrige Nachttemperaturen) das Streckungswachstum fördern. Die Ziele dieser Strategien sind die Optimierung der Pflanzenqualität, die Hemmung des Streckungswachstums und die Erhöhung der Pflanzengesundheit. Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Umsetzung.

DIFF

Erzielung einer negativen Temperaturdifferenz (DIFF) zwischen Tag- und Nachttemperatur zur Hemmung des Streckungswachstums; das heißt, die Nachttemperatur liegt über der Tagtemperatur (siehe Abb. 4). Der Nachteil besteht darin, dass es während einiger Phasen des Jahres nicht möglich ist, die Tagtemperatur unter der Nachttemperatur zu fahren. In Gewächshäusern mit schlechter Wärmedämmung führt diese Strategie zu einem höheren Energieverbrauch.

DROP oder Cool Morning

Ein Drop ist ein Temperatursturz am frühen Morgen, um die durchschnittliche Tagtemperatur abzusenken und so eine negative Tag-/Nachttemperaturdifferenz zu erzielen (DIFF); in den wärmeren Monaten ist dies die einzige Möglichkeit, dies effizient umzusetzen. Um die langfristige Einhaltung der angestrebten Tagesmitteltemperatur zu gewährleisten und die Kulturzeit nicht zu verlängern, muss die Nachttemperatur täglich angepasst werden. Die Kombination von DROP mit einem ständigen Nachttemperatursausgleich führt zu einer dynamischen Regelstrategie.

DIFF & DROP

Dies ist eine effiziente Kombination beider Strategien, das heißt der Absenkung der durchschnittlichen Tagtemperatur durch DROP und die gleichzeitige Erhöhung der Nachttemperatur zur Erzielung einer negativen Temperaturdifferenz. Eine Energieeinsparung ist bei dieser Strategie allerdings nicht zu erwarten.

5 Probleme und Grenzen

Zahlreiche dynamische Regelstrategien stehen mittlerweile für den praktischen Einsatz zur Verfügung. Das Energieeinsparpotenzial ohne Qualitätsverluste oder Kulturzeitverzögerungen liegt in Größenordnungen von 10 bis 20 %. Die reale Einsparung ist dabei abhängig von dem Herangehen an die jeweiligen Grenzbereiche der Temperatursollwerte. Je „mutiger“ diese Grenzen beschränkt werden, desto stärker ist der Spareffekt. Desto größer ist natürlich auch das Risiko einer Ertragsbeeinträchtigung. Dynamische Regelstrategien verlangen vom Kultivateur ein Umdenken. Die „Gefühlskontrolle“ der Gewächshaustemperatur funktioniert beim Einsatz dynamischer Regelstrategien nur bedingt. Vielmehr muss das Vertrauen in die Regeltechnik und die Überwachung der langfristigen Temperatursumme bzw. Tagesmitteltemperatur am Klimarechner im Vordergrund stehen.

Einteilung der dynamischen Regelstrategien nach der vorrangigen Zielsetzung

Einsparung von Heizenergie:

- Windgeschwindigkeitsabhängige Temperaturführung
- Außentemperaturabhängige Regelung
- Temperatursummenregelung (24 h-Integration)
- Mehrtägige Integration (1 bis maximal 7 Tage)
- Strahlungs-/lichtabhängige Temperaturführung (je nach Auslegung)

Optimierung des Pflanzenwachstums:

- DIFF
- DROP (Cool Morning)
- Strahlungs-/lichtabhängige Temperaturführung (je nach Auslegung)
- IntelliGrow

Gesunderhaltung der Pflanzen:

- Entfeuchtungsregelung
- DIFF (kulturabhängig)

Qualitätsförderung und -erhaltung:

- Strahlungs-/lichtabhängige Temperaturführung (je nach Auslegung)

Bei einigen der genannten Regelstrategien besteht die Gefahr, dass aufgrund der hohen Tag-/Nachttemperaturdifferenzen die Luftfeuchtigkeit im Gewächshaus in kritische Bereiche ansteigt. Eine Überwachung der Luftfeuchtigkeit bzw. der zusätzliche Einsatz einer Entfeuchtungsregelung sind sinnvoll oder sogar zwingend notwendig. Die Regelung der Heizungs- bzw. Lüftungstemperatur in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit stellt selbst eine dynamische Regelkomponente dar. Eine optimierte Einbindung einer Entfeuchtung in die vorhandenen dynamischen Regelstrategien wäre wünschenswert, um zu jedem Zeitpunkt die hinsichtlich des Energieverbrauchs günstigste Kombination von Innen-/Außentemperatur, Heizungs-Lüftungssollwerten, Lüftungskappenstellung und Wasserdampfsättigungsdefizit zu ermitteln.

Intelligente „Regelstrategie“-Lösungen verursachen oft nur geringe Investitionskosten, können aber deutliche wirtschaftliche Vorteile bringen. Allerdings sind sie in der Regel mit einem erhöhten Aufwand an Zeit und Betreuung für die betriebsspezifische Optimierung verbunden.

Literatur

HENDRIKS, L. (1994): Neue Temperaturregelstrategien I. Pflanzenbauliche Grundlagen. KTBL, Darmstadt (KTBL-Arbeitsblatt Gartenbau 0676)

HENNING, V. et al. (2006): Brennpunkt Energie – Reduktion von Energiekosten im Gartenbau. Dynamische Pflanzenreaktionen zur Energieeinsparung nutzen – das IntelliGrow-System. KTBL, Darmstadt (KTBL-Heft 56, S. 39-42)

JENNERICH, L., HENDRIKS, L. (1997): Temperaturregelstrategien. Forschungsanstalt Geisenheim, TASPO-Praxis, Thalacker Medien, Braunschweig

LUDOLPH, D. (1989): Dynamische Regelstrategien – Grenzen und Möglichkeiten. Zierpflanzenbau 29, Nr. 4, S. 150-154

MENNE, A. (1992): Reaktion einiger Zierpflanzen auf mehrtägige Fluktuationen von Temperatur und Lichtintensität. Dissertation Universität Hannover

ROSENQUIST, E., MAZANTI Aaslyng, J. (2000): IntelliGrow – a new climate control concept. grøen viden 122

ROSENQUIST, E. (2004): IntelliGrow – a new climate control concept. Vortrag am Institut für Gartenbau FA/FH Weihenstephan, 03.06.2004

WARTENBERG, S. (2005): Die Heizung steuern – Programme können Energie einsparen. Das Taspo Magazin 5, Nr. 7/8, S. 36-38

WARTENBERG, S. (2006): Energiesparprogramm „Pillnitz“. Pillnitzer Zierpflanzenbau-Informationen

Gartenbau

Dynamische Klimaregelstrategien

1 Einführung

Die Produktion von Zierpflanzen und Gemüse unter Glas erfordert unter den Klimabedingungen Nord- und Mitteleuropas besonders in den Wintermonaten hohe Energieaufwendungen zur Klimatisierung der Gewächshäuser. Unter dem Zwang steigender Energiekosten sind in den letzten Jahren verstärkt Anstrengungen unternommen worden, den Heizenergieverbrauch durch technische Maßnahmen, wie z. B. die Installation neuer Heizanlagen, zu reduzieren. Wenn man von der Züchtung wenig wärmebedürftiger Sorten absieht, wurden die Möglichkeiten, die das pflanzliche Wachstumspotenzial bietet, bisher vergleichsweise wenig ausgeschöpft.

Bei der herkömmlichen Temperaturführung werden die Heizungssollwerte für den Tag und die Nacht sowie die Lüftungstemperatur möglichst konstant gehalten. Dabei wird angenommen, dass optimales Pflanzenwachstum und eine schnelle generative Entwicklung nur bei den als optimal geltenden Temperaturen möglich sind. Diese statische Temperaturführung hat aber entscheidende Nachteile. Sie ist in Zeiten mit ungünstigen Außenbedingungen, etwa bei hoher Windgeschwindigkeit oder niedrigen Temperaturen, sehr energieaufwändig. Außerdem bleiben zeitweilig bestehende Wachstumsbegrenzungen durch andere Klimafaktoren, wie eine geringe Einstrahlung, unberücksichtigt.

Besonders aussichtsreich bei der Entwicklung neuer Technologien zur Energieeinsparung scheinen daher dynamische Klimaregelstrategien, bei denen vor allem der teure Produktionsfaktor Wärme sowohl an die außenklimatischen Bedingungen als auch an das Wachstumspotenzial der Pflanzen angebunden wird. Charakteristisch für diese Strategietypen ist, dass keine konstanten Temperaturen auf die Pflanzen einwirken, sondern die Temperaturen in unterschiedlich langen Zeiträumen stark variieren können.

Die technischen Grundvoraussetzungen für die Anbindung des Gewächshausklimas an die Außenbedingungen sind durch die Einführung von Klimacomputern in weiten Bereichen des Intensivgartenbaus geschaffen.

Strategie bedeutet im allgemeinen Sprachgebrauch nichts anderes als ein genau geplantes Vorgehen zum Erreichen eines bestimmten Zieles. Der Einsatz einer Klimaregelstrategie im Gartenbau ist daher nichts anderes als die Beeinflussung einer oder mehrerer Regelgrößen (z. B. der Gewächshausinnentemperatur) durch ein genau geplantes Vorgehen oder aber das Erreichen eines genau geplanten Zieles durch die Beeinflussung der Regelung.

Hieraus resultiert eine Einteilung der Regelstrategien nach ihrer Hauptzielsetzung. Solche Ziele könnten sein:

1. Einsparen von Energie, besonders Heizenergie
2. Optimieren des Pflanzenwachstums
3. Gesunderhaltung der Pflanzen
4. Fördern und Erhalten der Pflanzenqualität (sowohl der äußeren als auch der inneren; z. B. bei Gemüse)

Einzelne Strategien können miteinander im Konflikt stehen. Eine maximale Energieeinsparung zum Beispiel ist oft nur dadurch zu erreichen, dass man Einschränkungen beim Pflanzenwachstum oder auch der Gesunderhaltung der Pflanzen macht.

Daneben kann es durchaus sinnvoll und notwendig sein, während bestimmter Entwicklungsphasen der Pflanzen verschiedene Ziele zu verfolgen. Dies abzuwägen und die jeweils passende Strategie auszuwählen, ist die anspruchsvolle Aufgabe des Kultivateurs.

Neben der Einteilung nach ihrer Zielsetzung lassen sich die Strategien auch nach ihrer Komplexität unterscheiden. Einfache Regelstrategien sind dadurch gekennzeichnet, dass nur eine Regelgröße in Abhängigkeit von einem äußeren Faktor beeinflusst wird. Hierzu gehört z. B. die windgeschwindigkeitsabhängige Regelung der Gewächshausinnentemperatur. Aufwändigere Regelstrategien beziehen entweder mehrere Regelgrößen und/oder mehrere Einflussgrößen mit in die Regelung ein. Besonders komplex werden Klimaregelstrategien, wenn als Grundlage für die jeweilige Sollwerteinstellung pflanzenphysiologische Parameter, wie z. B. die Nettophotosyntheserate, mit herangezogen werden.

2 Grundsätzliche Temperaturreaktionen von Zierpflanzen

Damit die Wirkung einzelner Regelstrategien auf das Pflanzenwachstum besser beurteilt werden kann, sind die grundsätzlichen Temperaturreaktionen von Zierpflanzen noch einmal kurz beschrieben.

Pflanzliches Wachstum findet über einen weiten Temperaturbereich statt. Hierbei gibt es Optimalbereiche, die für verschiedene Wachstums- und Entwicklungsprozesse unterschiedlich sein können. Für die Photosynthese einer bestimmten Pflanze kann die Optimaltemperatur durchaus in einem ganz anderen Bereich liegen als zum Beispiel für die Wurzelbildung. Optimal wächst eine Pflanze immer dann, wenn möglichst viele Prozesse im Temperaturoptimum laufen. Im Gegensatz dazu heißt dies natürlich auch, dass pflanzliches Wachstum suboptimal sein muss, wenn z. B. die Heiztemperaturgrenzen bei Energiesparstrategien maximal ausgeschöpft werden.



Abb. 1: Die Tagesmitteltemperatur ist entscheidend für die Blatt- und Blütenanlage sowie für die Kulturdauer, von links nach rechts: 14, 16, 18 und 20 °C Tagesmitteltemperatur

Tab. 1: Einfluss konstanter und mehrtägig wechselnder Temperaturen auf Wachstum und Kulturdauer von Topfchrysanthemen (*Dendranthema grandiflorum*) und Poinsettien (*Euphorbia pulcherrima*), Wechsel für 2, 4 oder 8 Tage zwischen 24 und 16 °C, KT = Kurztage, d = Tag (MENNE 1992)

Temperatur	Dendranthema grandiflorum 'Garland'		Euphorbia pulcherrima 'A. H. Diamond'	
	Trieblänge in cm	Anzahl KT bis Blüte	Trieblänge in cm	Anzahl KT bis Blüte
konstant 20 °C	10,6	58,9	6,7	66,4
24 - 16 °C 2 d	12,7	58,2	7,8	65,8
24 - 16 °C 4 d	12,9	58,1	7,6	66,7
24 - 16 °C 8 d	11,7	57,9	7,3	68,8

Im Allgemeinen wird die Bildung von Frischmasse, die Anlage und Entwicklung von Blättern sowie die Blütenentwicklung durch die durchschnittliche Tagesmitteltemperatur bestimmt (Abb. 1). Bis zu einer bestimmten Grenze werden diese Prozesse durch eine zunehmende Tagesmitteltemperatur gefördert. Eine langfristige Unterschreitung der für eine bestimmte Entwicklung notwendigen Tagesmitteltemperatur führt daher zwangsläufig zu einer Kulturzeitverlängerung. Die Überwachung und exakte Einhaltung dieses Parameters (als 24-Stunden-Durchschnittstemperatur, als langfristiges Temperaturmittel oder als Temperatursumme) ist immer dann zwingend notwendig, wenn eine termingerechte Produktion durchgeführt werden muss.

Die Induktion und Anlage von Blüten wird oft durch spezifische Tag- und Nachttemperaturen mit engem Optimalwert gesteuert. So verzögern zum Beispiel Temperaturen über 22 °C während der Induktionsphase die Blütenbildung von dunkellaubigen Poinsettien (*Euphorbia pulcherrima*). Zahlreiche Untersuchungen belegen, dass bei vielen Pflanzenarten das Streckungswachstum (Spross, Blütenstiele und Blattfläche) durch die Temperatur während des Tages bzw. die Temperaturdifferenz zwischen Tag und Nacht bestimmt wird. Die Einlagerung von Kohlenhydraten wird in erster Linie durch die Nachttemperatur bestimmt (bzw. Temperaturdifferenz Tag – Nacht). Hohe Nachttemperaturen bei gleichzeitig geringer Einstrahlung führen zu einer starken Veratmung der Reserven.

Bei Beachtung dieser grundsätzlichen Reaktionen kann man für viele Pflanzenarten abschätzen, wie sie bei verschiedenen Strategien reagieren werden. Treten z. B. bei bestimmten Strategien häufig Situationen ein, bei denen auf hohe Temperaturen am Tag niedrige Temperaturen in der Nacht folgen, werden sich die meisten Pflanzen übermäßig stark strecken. Wird bei anderen Strategien die durchschnittliche Tagesmitteltemperatur langfristig nicht eingehalten, ist z. B. mit einer Verlängerung der Kulturdauer zu rechnen.

Besonders interessant für die Nutzung von komplexeren Heizenergiesparstrategien ist das Wissen über die Integrationsfähigkeit von Pflanzen. Sowohl hinsichtlich der Nutzung von Strahlung zur Photosynthese als auch von Wärme sind Zierpflanzen in der Lage fluktuierende Klimabedingungen in bestimmten Grenzen zu integrieren. Das heißt, auf wechselnde Bedingungen genauso zu reagieren wie auf konstante mittlere Bedingungen (MENNE 1992). Tab. 1 zeigt zum Beispiel, dass die Kulturdauer von Topfchrysanthemen (*Dendranthema grandiflorum*) bei konstant 20 °C genauso lang ist wie bei zwei-, vier- oder achttägigen Temperaturwechseln zwischen 16 und 24 °C.

3 Dynamische Klimaregelstrategien

Das größte Interesse finden zurzeit Strategien, die möglichst viel Heizenergie einsparen. Energiesparstrategien beruhen in der Regel auf zwei Prinzipien. Das erste Prinzip ist, möglichst viel Sonnenenergie für die Aufheizung im Gewächshaus zu speichern. Das zweite Prinzip beruht darauf, zu Zeiten, in denen mit hohen Energieverlusten zu rechnen ist, die Heiztemperatur abzusenken und dagegen in Phasen mit relativ geringen Verlusten den Sollwert anzuheben. Darüber hinaus gibt es natürlich noch eine Reihe anderer Strategien, deren Zielsetzung eine andere ist.

3.1 Windabhängige Regelung

Bei der windabhängigen Regelung wird die Heiztemperatur an die Windgeschwindigkeit gekoppelt (z. B. Absenkung der Heiztemperatur (HT) um 5 °C im Windband von 2 – 10 m/s). Da kein automatischer Ausgleich der Tagesmitteltemperatur stattfindet, führt diese Strategie zu einer Absenkung der durchschnittlichen Tagesmitteltemperatur und damit zu einer möglichen Kulturzeitverlängerung. Der Einspareffekt (bis zu 5 % der Heizenergie) hängt in erster Linie ab von der Dichtigkeit der Gewächshäuser und dem verwendeten Energieschirm. Diese Strategie ist besonders effektiv in schlecht isolierten Gewächshäusern und windexponierten Lagen.

3.2 Licht- und strahlungsabhängige Regelung

Die Begriffe licht- und strahlungsabhängige Regelung werden zum Teil synonym gebraucht, zum Teil sind aber auch verschiedene Strategien in Abhängigkeit von der Führungsgröße (aktuelle Beleuchtungsstärke oder Globalstrahlungssumme) gemeint. Im Vordergrund dieser Strategien stehen neben der Energieeinsparung durch stärkere Ausnutzung der Strahlungswärme der Sonne auch Überlegungen zur Stoffbilanz der Pflanzen.

Lichtabhängige Temperaturführung – Lichtkorrektur

Die lichtabhängige Regelung wird vereinzelt auch nur als Lichtkorrektur bezeichnet und beruht darauf, dass die Heiztemperatur am Tag an die aktuelle Beleuchtungsstärke (lichtabhängig) oder an die Globalstrahlung (strahlungsabhängig) angepasst wird. Ausgehend von der Vorstellung, dass mit zunehmender Einstrahlung das Temperaturoptimum für das pflanzliche Wachstum ansteigt, wird in einem bestimmten Bereich der Beleuchtungsstärke oder der Globalstrahlung (= Licht- bzw. Strahlungsband) die Temperatur angehoben bzw. abgesenkt (Beispiele siehe Tab. 2).

Strahlungsabhängige Nachttemperaturführung – Veratmungsstrategie

Die strahlungsabhängige Regelung ist dadurch gekennzeichnet, dass in erster Linie die Nachttemperatur der Tagesstrahlung (Strahlungssumme) nachgeführt wird. Bei hoher Einstrahlung am Tag wird auch die Nachttemperatur angehoben und umgekehrt. Diese Strategie, auch Veratmungsstrategie genannt, basiert auf der Vorstellung, dass Pflanzen während und nach einem einstrahlungsreichen Tag viel Wärme benötigen, um Assimilate zu verlagern und zu verarbeiten. Bei niedriger Einstrahlung muss dann auch die Temperatur abgesenkt werden, um eine uner-

Begriffeerklärung	
Tagesmitteltemperatur (TMT): Durchschnittstemperatur eines 24-h-Tages, gelegentlich auch als 24-h-Mitteltemperatur bezeichnet	
Tagtemperatur (TT): Durchschnittstemperatur während des Tages (Lichtphase), gelegentlich auch als mittlere Tagtemperatur bezeichnet	
Nachttemperatur (NT): Durchschnittstemperatur während der Nacht (Dunkelphase), gelegentlich auch als mittlere Nachttemperatur bezeichnet	
DIFF: Temperaturdifferenz zwischen der Tag- und Nachttemperatur; Bsp.: TT/NT = 22/18 °C, DIFF = +4 TT/NT = 18/22 °C, DIFF = -4	
DROP: Drastische Temperaturabsenkung am frühen Morgen, gelegentlich auch als Cool Morning bezeichnet	
Temperatursumme: Summe der Temperatur über einen bestimmten Zeitraum, z. B. 20 °C für 24 Stunden = 480 °Ch oder 24 °C für 12 h plus 16 °C für 12 Stunden = 480 °Ch bzw. Kh (°C- bzw. Kelvin-Stunden), gelegentlich (fälschlicherweise) auch als Wärmesumme bezeichnet	
Lichtmenge: Produkt aus der durchschnittlichen Beleuchtungsstärke und der Beleuchtungsdauer bzw. als Integral über einen bestimmten Zeitraum (Tag, Woche, Monat); oft auch als Lichtsumme bezeichnet	

auch die theoretische Reduzierung der Heizkosten ist groß. Begrenzt wird dieser Spielraum zum einen durch die Grenzen der Integrationsfähigkeit der Pflanzenarten und zum anderen durch die Einhaltung bestimmter Kulturzeiten. Je kürzer die Kulturdauer einer Pflanzenart, desto geringer sind die Möglichkeiten zur Ausschöpfung des Einsparpotenzials.

Die dynamische Außentemperaturkorrektur ist mit verschiedenen anderen Heizungsprogrammen wie z. B. „Cool Morning“ oder DIFF kombinierbar und kann Einsparungen von 10 bis 20 % der Heizkosten erzielen. Einfach zu handhabende Varianten der dynamischen Außentemperaturkorrektur (ohne Temperatursummenkontrolle) sind die Energiesparprogramme „Pillnitz sanft“ und „Pillnitz stark“ (WARTENBERG 2006).

3.5 Strategien der Zukunft

Seit Jahrzehnten wird zur Steuerung des Pflanzenwachstums in erster Linie die Temperatur der Luft im Gewächshaus gemessen und nach einem vorgegebenen Sollwert geregelt. Einfache Regelstrategien nutzen nur die Gewächshausinnentemperatur als Regelgröße.

Andere, komplexere „Speaking Plant“-Konzepte basieren nicht nur auf der Messung der Temperatur, sondern auf weiteren, pflanzenphysiologisch wichtigen Größen. Neben der Blattgewebetemperatur werden zum Beispiel Transpirationsmengen, Spaltöffnungsbewegungen und Nettophotosyntheseleistungen ständig erfasst und von Computern ausgewertet. Mit Hilfe dieser Messgrößen lassen sich die Abhängigkeiten der Pflanzenreaktion auf sich verändernde Umweltbedingungen sehr gut darstellen. Zu jedem Zeitpunkt kann festgestellt werden, wie die Pflanze auf mehr oder weniger Einstrahlung, Wärme oder Wasser reagiert. Zur Erfassung solcher Daten sind kompliziertere Messapparaturen notwendig als sie üblicherweise gebraucht werden. Die jeweilige Nettophotosyntheseleistung wird mit so genannten Gaswechselmesssystemen gemessen. Solche Messgeräte messen zum Beispiel direkt an einem oder mehreren Blättern die Differenz zwischen aufgenommenem und abgegebenem CO₂. Bei diesen sehr aufwändigen Messapparaturen besteht zum Teil das Problem, dass sie nicht die wirklichen Bedingungen im Bestand widerspiegeln, sondern selbst kleine künstliche Systeme darstellen.

Obwohl die Konzepte der sprechenden Pflanzen durchaus viel versprechend sind, existiert auch hier ein Grundproblem, das gegen eine baldige Einführung dieser Regelungsmöglichkeiten in die gärtnerische Praxis spricht. Der überwiegende Teil der Empfehlungen und Vorgaben für die Beeinflussung der Umweltfaktoren zur Pflanzenproduktion besteht nach wie vor aus Größen wie Heiztemperatur, Schattiersollwert oder CO₂-Gehalt der Raumluft, aber nicht aus pflanzenphysiologischen Größen. Es wird also noch eine Weile dauern, bis genügend Daten erarbeitet sind, um solche pflanzenphysiologischen Größen als Sollwerte benutzen zu können.

Tab. 5: Beispiele für Einstellwerte für eine außentemperaturabhängige Regelung (Außentemperaturkorrektur), T = Tag, N = Nacht, AT = Außentemperatur, HT = Basis-Heizungssollwert, TS = Temperatursumme, Kh = Kelvinstunden

Klimaeinstellwert	Einheit	Euphorbia pulcherrima	
		ab KW 32	ab KW 42
Basis-Heizungssollwert T/N	°C	18/20	
Mitteltemperatursollwert	°C	18	
Anhebung von/bis AT – HT	K	-5/-2	
Anhebung von/bis TS-Differenz	Kh	300/0	
Absenkung von/bis AT – HT	K	-9/-14	
Absenkung von/bis TS-Differenz	Kh	-300/0	
max. Anhebung/Absenkung	K	+2,5/-6,0	+2,5/-3,0
Lüftungssollwert T/N	°C	20/23	21/23

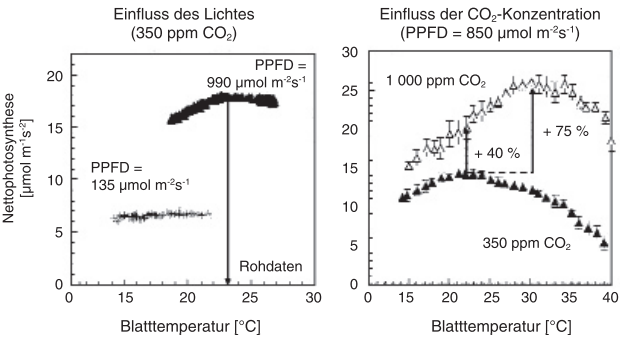


Abb. 3: Photosynthese von Chrysanthemum x grandiflorum ‘Coral Charm’ in Abhängigkeit von der Temperatur bei zwei verschiedenen CO₂-Konzentrationen und bei unterschiedlichen Einstrahlungen, PPFD = Photosynthetic Photon Flux Density (Photosynthetische Photonenstromdichte) (HENNING et al. 2006, nach ROSENQUIST 2004)

3.6 IntelliGrow

Einen Weg in die oben aufgezeigte Zukunft stellt das vor einigen Jahren in Dänemark entwickelte System „IntelliGrow“ dar. Bei dieser relativ komplexen Regelstrategie werden Klimafaktoren jeweils an den physiologischen Bedarf der Pflanzen angepasst.

Grundlage von „IntelliGrow“ sind die Grundkurven der Photosyntheseabhängigkeit der zu kultivierenden Pflanzenart, wie Abb. 3 für Chrysanthemen zeigt. Das Temperaturoptimum der Photosynthese ist dabei von der Einstrahlung und vom CO₂-Gehalt der Luft abhängig. Steigt die Einstrahlung an, steigt das Temperaturoptimum. Steigt zum Beispiel die Beleuchtungsstärke von 7 auf 50 klx an (135 auf 990 µmol m⁻² s⁻¹), findet maximale Photosynthese nicht mehr bei 16 sondern bei 23 °C statt. Wird zusätzlich der CO₂-Gehalt der Luft von 350 auf 1 000 ppm erhöht, steigt das Temperatur-optimum auf bis zu 30 °C.

Ausgehend von der gegebenen Einstrahlung werden die Wachstumsfaktoren Wärme und CO₂ an der aktuellen Photosyntheseleistung der jeweiligen Pflanzenart ausgerichtet. In der Praxis führt dieses Prinzip zu der Konsequenz, dass sehr hohe Tag-/Nachttemperaturamplituden auftreten können, da an strahlungsreichen Tagen die Heizungstemperatur am Tag sehr hoch ist (z. B. Heiztemperatur tags 28 – 30 °C, nachts 15 – 16 °C). Bei CO₂-Einsatz muss die Lüftungstemperatur zwangsläufig hoch sein. „IntelliGrow“ ist eine strahlungsabhängige Regelstrategie, die zusätzlich den Faktor CO₂ berücksichtigt. Der Bereich der Strahlungsabhängigkeit könnte sich zum Beispiel in einem Bereich von 10 – 100 klx und einer Heiztemperatur von 16 – 27 °C bewegen. Der Klimarechner ermittelt aus der ihm zur Verfügung stehenden Photosynthesegrundkurve für die jeweilige Pflanzenart die aktuell effektivste Kombination aus Einstrahlung, Temperatur und CO₂. Aufgrund der Strahlungsabhängigkeit kommt es in längeren strahlungsarmen Phasen zu niedrigen Tagesmitteltemperaturen. Eine zusätzliche Überwachung der Tagesmitteltemperatur ist daher nötig, um Kulturzeitverzögerungen zu vermeiden.

Diese Regelstrategie der Zukunft, die mittlerweile bei verschiedenen Kulturen in Dänemark und Deutschland erprobt wurde, verspricht eine starke Optimierung des Energieeinsatzes mit Einsparungen von bis zu 30 % (ROSENQUIST 2000, HENNING et al. 2006). Besonders aussichtsreich scheint die Strategie für die Gemüseproduktion, da hier in erster Linie der Massenertrag im Vordergrund steht. Bei der Produktion von Zierpflanzen führen Einschränkungen aufgrund qualitativer Beeinträchtigungen zu etwas geringeren Energieeinsparungen.

4 Statische Temperaturregelstrategien

Der Vollständigkeit halber seien hier noch zwei Regelstrategien genannt, die im Grenzbereich zwischen statischer und dynamischer Regelung funktionieren, aber eine relativ große praktische Bedeutung besitzen.

Die Negative Temperaturdifferenz (DIFF) und das Cool Morning (DROP) basieren auf der Erkenntnis, dass Kombinationen mit nied-

Tab. 2: Beispiele für Einstellwerte für eine licht- bzw. strahlungsabhängige Temperaturführung von Poinsettien (*Euphorbia pulcherrima*) und Pelargonien (*Pelargonium*)

Klimaeinstellungen	Kulturen	
	<i>Euphorbia pulcherrima</i> (dunkellaubige Sorten) ¹	<i>Pelargonium</i>
Anpassung Nachttemperatur		
Heiztemperatur (°C) Tag	18	12
Heiztemperatur (°C) Nacht ²	14 – 18	12 – 20
Lüftungstemperatur (°C) Tag	20 (22)	22
Lüftungstemperatur (°C) Nacht	20 (22)	22
Anpassung Tagtemperatur		
Heiztemperatur (°C) Tag ³	15 – 20	
Heiztemperatur (°C) Nacht	16	
Lüftungstemperatur (°C) Tag	20 (22)	
Lüftungstemperatur (°C) Nacht	20 (22)	

¹ Anpassung der Nacht- und Tagtemperatur: Einstellungen von KW 32 bis KW 48, um ein starkes Absinken der Tagesmitteltemperatur zu Kulturende zu vermeiden, muss evtl. das Strahlungsband korrigiert werden.
² im Strahlungsband von 500 bis 4000 Wh/m² x Tag
³ im Lichtband von 5 bis 25 klx

wünschte Veratmung zu vermeiden. Nach einem strahlungsreichen Tag mit relativ hohen Tagtemperaturen folgt eine Nacht mit ebenfalls relativ hohen Temperaturen. An einstrahlungsarmen Tagen ist dagegen die Tag- und Nachttemperatur relativ niedrig. Dadurch kommt es zu einer langfristigen Anpassung der Tagesmitteltemperatur an die Strahlungsverhältnisse, d. h. mit abnehmender Einstrahlung wird die Mitteltemperatur automatisch abgesenkt bzw. bei zunehmender Einstrahlung angehoben. (z. B. Nachttemperatursollwert zwischen 14 und 20 °C in einem Strahlungsbe- reich von 500 – 4 000 Wh/m² Tag). Im Herbst besteht die Gefahr, dass im Verlauf der Kultur die durchschnittliche Tagesmitteltemperatur absinkt, in diesem Fall muss das Strahlungsband korrigiert werden. Im Frühjahr kann der entgegengesetzte Fall eintreten. Positiv an dieser Strategie ist, dass keine großen Tag-/Nachttemperaturdifferenzen auftreten. Die Gefahr der Taupunktunterschreitung und eines übermäßigen Streckungswachstums ist daher gering. Der Einspareffekt der licht- bzw. strahlungsabhängigen Regelung kann bis zu 15 % betragen.

3.3 Temperatursummenregelung

Die Temperatursummenregelung basiert auf der Vorstellung, dass eine bestimmte Temperatursumme – im Gegensatz zur Einhaltung konstanter Optimaltemperaturen – für das Erreichen eines bestimmten Kulturzieles ausreicht. Besonderes Kennzeichen bei dieser Strategie ist die Verwendung einer Summe als Führungsgröße für die Regelung. Das Hauptziel dieser Strategien ist, durch eine möglichst hohe Ausnutzung der Sonnenstrahlung Heizenergie einzusparen.

Vor etwa 18 Jahren wurde die erste Temperatursummenregelung entwickelt und in der Praxis überprüft. Diese Regelung beruhte auf einem Temperatursausgleich innerhalb eines Tages. Mittlerwei-

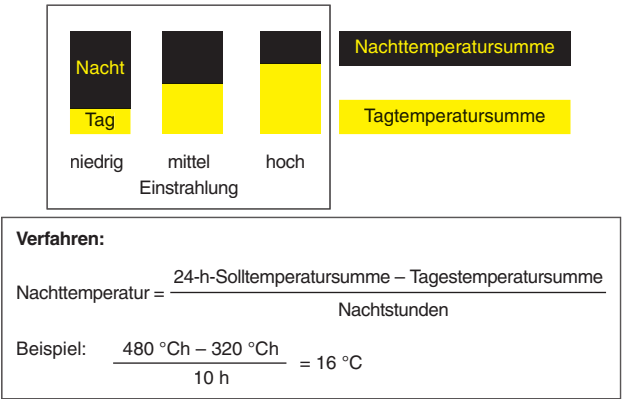


Abb. 2: Prinzip der Temperatursummenregelung

le ist vor allem aufgrund der Weiterentwicklung der Klimacomputer auch der Einsatz von mehrtägigen Integrationsstrategien möglich.

Eintägige Temperatursumme

Aus ökonomischen Gründen wird bei der eintägigen Temperatursummenregelung das Ziel verfolgt, durch hohe Lüftungstemperaturen am Tage möglichst viel kostengünstige Wärme einzufangen und in der folgenden Nacht nur den Fehlbetrag an der 24-h-Solltemperatursumme (z. B. 24 Stunden x 17 °C = 408 °C Stunden) aufzufüllen. Es wird also jeweils nur ein bestimmtes Wärmedefizit aufgefüllt. Von der 24-Stunden-Solltemperatursumme wird die Temperatursumme abgezogen, die bei hoher Lüftungstemperatur während der Lichtphase aufsummiert wurde, danach wird durch Anpassung der Nachttemperatur das verbliebene Defizit an der angestrebten Temperatursumme aufgefüllt (Abb. 2). Bei hoher Einstrahlung und hoher Tagtemperatursumme ist die folgende Nachttemperatur niedrig, nach Tagen mit niedriger Einstrahlung ist die Nachttemperatur dagegen vergleichsweise hoch.

Die eintägige Temperatursummenregelung ist besonders dadurch gekennzeichnet, dass an einstrahlungsreichen Tagen große Tag-/Nachttemperaturamplituden auftreten. Dies hat zwei gravierende Nachteile. Zum einen wird bei empfindlichen Pflanzenarten das Streckungswachstum stark gefördert, zum anderen besteht die Gefahr, dass nach hohen Tagtemperaturen und einer vergleichsweise starken Absenkung in der Nacht der Taupunkt unterschritten wird und die Gefahr von Pilzinfektionen steigt. Um dies zu vermeiden, muss die Luftfeuchtigkeit besonders beachtet werden.

Der Einspareffekt der Temperatursummenregelung ist zum einen umso größer, je höher die Einstrahlung und je niedriger die Außentemperatur ist. Zum anderen steigt das Einsparpotenzial an, je weiter die Grenzen zwischen Lüftungstemperatur am Tag (z. B. 30 °C) und der Heiztemperatur in der Nacht (z. B. 6 °C) gesetzt werden (Sollwertbeispiele siehe Tab. 3). An strahlungsreichen Tagen kann dann die Einsparung gegenüber einer konstanten Tag-/Nachttemperaturführung bis zu 30 % betragen. Über einen längeren Zeitraum ist bei Einhaltung der angestrebten Tagesmitteltemperatur eine durchschnittliche Energieeinsparung von 5 bis 15 % zu erwarten (Tab. 4). Die eintägige Temperatursummenregelung ist besonders effektiv in Gewächshäusern mit schlechter Wärmedämmung.

Mehrtägige Temperatursumme – Temperaturintegration

Bei der eintägigen Temperatursummenregelung muss die Temperatursumme innerhalb von 24 Stunden ausgeglichen werden. Dies kann dazu führen, dass auch bei niedrigen Außentemperaturen und geringer Einstrahlung auf einen bestimmten Sollwert

Tab. 3: Beispiele für Einstellwerte (KW 30 bis KW 44) bei Poinsettien (*Euphorbia pulcherrima*) und Pelargonien (*Pelargonium*) für eine Temperatursummenregelung; in den ersten zwei Kurztagwochen wurden bei den Poinsettien hohe Tagtemperaturen vermieden, um die Induktion zu verzögern

Klimaeinstellungen	Kulturen	
	<i>Euphorbia</i>	<i>Pelargonium</i>
Angestrebte Tagesmitteltemperatur (°C)	20	18
Temperatursumme (°Ch pro Tag)	480	432
Heiztemperatur Tag (°C)	16	16
Heiztemperatur Nacht (°C)	8 – 24	8 – 20
Lüftungstemperatur Tag (°C)	28	26
Lüftungstemperatur Nacht (°C)	28	26

Tab. 4: Einfluss der Regelstrategie auf den Wärmeverbrauch und die Kulturdauer von Poinsettien (*Euphorbia pulcherrima*), Tagesmitteltemperatur in den Kalenderwochen 31 bis 46, Kulturdauer in Tagen ab Topfen bis Verkaufsreife

Regelstrategie	Tagesmitteltemperatur °C	Wärmeverbrauch Wh/m ² %	Kulturdauer d	Pflanzenhöhe cm
Konventionell	21,2	105 100	134	27,7
Strahlungsabhängige Nachttemperaturführung T > N (Positiv DIFF)	20,7	84 80	134	26,9
T < N (Negativ DIFF)	20,8	124 118	>138	25,9
Temperatursumme	21,5	95 90	133	27,2

geheizt werden muss, da man die Sonneneinstrahlung nicht nutzen kann.

Durch die Ausdehnung des Integrationszeitraumes auf mehrere Tage ist eine stärkere Anpassung an mehrtägige Einstrahlungs- und Außentemperaturschwankungen möglich, der Einspareffekt könnte sich dadurch vergrößern. Außerdem ergeben sich bei dieser Regelstrategie nur vergleichsweise geringe Tag-/Nachttemperaturamplituden und die Gefahr von verstärktem Streckungswachstum und Taupunktunterschreitung ist verringert. Für einen bestimmten Zeitraum werden die Pflanzen dann bei einer geringeren als der optimalen Temperatur kultiviert. Bedingung ist aber, dass die kältere Periode danach durch eine wärmere Periode mit höherer Temperatur kompensiert wird.

Besonders effektiv arbeiten solche Programme in Verbindung mit regionalen Wetterprognosen. Durch die Einbeziehung der Wetterprognose kann im Vorhinein abgeschätzt werden, wie lange und bis zu welchem Temperatursummendefizit abgesenkt bzw. angehoben werden kann. Da der Integrationszeitraum und die Grenzen der Integrationsfähigkeit stark von der Pflanzenart und dem Produktionsziel abhängig sind, muss definierbar sein, bis zu welcher Temperatursumme und um welchen Betrag die Gewächshausinnentemperatur abgesenkt bzw. angehoben werden darf. Wenn man z. B. eine Abweichung von etwa 300 Kelvin-Stunden nach oben oder unten zulässt, kann das eine Abweichung von etwa 4 K für 3 Tage bedeuten (für 3 Tage 16 °C statt 20 °C bzw. 3 Tage 24 °C) oder eine Abweichung von 1 K für 12 Tage (19 °C statt 20 °C). Bei Über- bzw. Unterschreiten der Integrationsgrenzen nach oben oder nach unten können auch irreversible Kälte- oder Hitzeschäden auftreten. Unterschreitet man z. B. bei Poinsettien längerfristig eine Temperatur von 8 °C treten irreversible Kältechlorosen auf.

Solche Langzeit-Integrationsprogramme (bis zu 7 Tage) sind in den Niederlanden mittlerweile bei einigen Kulturen, vor allem Gemüsekulturen, erprobt und in wenigen Klimacomputern als Heizungsregelprogramm („Temperaturintegration“) verfügbar. Bisher liegen jedoch erst wenige praktische Erfahrungen für Zierpflanzen vor.

3.4 Außentemperaturabhängige Regelung

Bei der außentemperaturabhängigen Regelung der Gewächshaus-temperatur wird ebenfalls das Langzeitintegrationsvermögen der Pflanzen ausgenutzt. Sie funktioniert ähnlich wie eine mehrtägige Temperatursummenregelung. Die Übergänge von beiden Regelstrategien können je nach Auslegung der Regelprogramme der verschiedenen Klimacomputer fließend sein. Diese Regelstrategien bieten zurzeit das größte Potenzial hinsichtlich der Energieeinsparung. In der Praxis sind zurzeit zwei Regelprogramme mit ähnlichem Namen (Außentemperaturkorrektur und dynamische Außentemperaturkorrektur), aber unterschiedlicher Funktion im Einsatz.

Außentemperaturkorrektur (AT)

Eines der Regelprogramme mit Anbindung an die Außentemperatur trägt den Namen „Außentemperaturkorrektur“. In Abhängigkeit von der Differenz zur jeweiligen Außentemperatur wird der Heizungssollwert für den Tag und/oder die Nacht in bestimmten Grenzen angehoben bzw. abgesenkt. Der Heizungssollwert folgt damit der Außentemperatur. Die gleichzeitige Überwachung der Temperatursumme bietet die Möglichkeit, die angestrebte Tages-

mitteltemperatur über die gesamte Kulturzeit so einzuhalten, dass es zu keinen Kulturzeitverzögerungen oder Qualitätsbeeinträchtigungen kommt. Je nach Kultur, Jahreszeit und angestrebter Energieeinsparung kann zusätzlich festgelegt werden, auf welche maximale Differenz die aktuelle Temperatursumme im Vergleich zur angestrebten durchschnittlichen Tagesmitteltemperatur absinken bzw. ansteigen darf und wie stark durch die jeweilige Sollwertanhebung bzw. -absenkung reagiert wird. Ist durch eine lange Phase mit niedrigen Außentemperaturen das maximale Defizit der

Temperatursumme (z. B. -400 Kelvin-Stunden) erreicht, wird die Korrektur des Heizungssollwertes nach der Außentemperatur stärker begrenzt oder so lange ausgesetzt bis die Außentemperaturen wieder ansteigen und das Temperatursummendefizit wieder reduziert wird (Beispiel siehe Tab. 5). In dem Beispiel wird die Tagtemperatur (Basis-Sollwert 18 °C) in einem Bereich der Außentemperatur von 13 – 16 °C um maximal 2,5 K angehoben, also auf max. 20,5 °C. Bei einer Außentemperatur von 4 – 9 °C wird die Heiztemperatur um bis 6 K abgesenkt, also auf minimal 12 °C am Tag. Die Absenkung findet statt bis zu einem maximalen Temperatursummendefizit von 300 Kelvin-Stunden.

Da dieses Programm allerdings immer der aktuellen Außentemperatur nachgefahren wird, sind auch hierbei relativ starke Tag-/Nachttemperaturschwankungen mit den beschriebenen Risiken möglich. Erste Erfahrungen mit dieser Regelstrategie lassen Energieeinsparungen von bis zu 20 % erwarten (WARTENBERG 2005).

Dynamische Außentemperaturkorrektur (dTAT)

Eine weitere Möglichkeit der Anbindung des Heizungssollwertes an die Außentemperatur bietet die so genannte dynamische Außentemperaturkorrektur. Im Gegensatz zur oben beschriebenen Außentemperaturkorrektur wird der aktuelle Heizungssollwert nicht durch die jeweilige Differenz zwischen Basis-Sollwert und aktueller Außentemperatur bestimmt, sondern durch die Differenz der aktuellen Außentemperatur zu der erwarteten Außentemperatur. Im Folgenden ist der Modelansatz (WARTENBERG 2005) dargestellt:

$$HT_{akt} = HT_{Basis} + F_1 \cdot (AT_{Ist} - AT_{Soll}) - F_2 \cdot (TS_{Ist} - TS_{Soll})^3$$

wenn $(AT_{Ist} - HT_{Basis}) \geq 0$, dann ist $F_1 = 0$

H_{Takt} = aktualisierter Heizungssollwert

HT_{Basis} = Basis-Heizungssollwert, z. B. 16 °C

F_1 = Skalierungsfaktor Außentemperaturkorrektur, z. B. 0,25 für Anhebung und 0,5 für Absenkung

AT_{Ist} = Ist-Wert Außentemperatur

AT_{Soll} = Erwartungswert Außentemperatur, langjähriges Stundenmittel

F_2 = Skalierungsfaktor für die Temperatursummenkontrolle, z. B. 5×10^{-8}

TS_{Soll} = Soll-Wert Temperatursumme

TS_{Ist} = Ist-Wert Temperatursumme

Die erwartete Außentemperatur stellt das langjährige Stundenmittel der Außentemperatur für den jeweiligen Standort dar. Zur Umsetzung dieses Programms sind daher Klimadaten für den jeweiligen Standort notwendig. Durch die Verwendung von „geglätteten“ Korrekturwerten, den langjährigen Mittelwerten, kommt es zwangsläufig zu einer stärkeren Anpassung der Gewächshaus-temperatur an längerfristige Witterungswechsel als an kurzfristige Tag-/Nachtwechsel. Große Differenzen in der Tag-/Nachttemperatur mit den Risiken der erhöhten Luftfeuchte und der übermäßigen Förderung des Streckungswachstums sind daher bei der dynamischen Außentemperaturkorrektur weniger stark ausgeprägt. Die langfristig angestrebte Tagesmitteltemperatur kann wiederum durch die Überwachung der Temperatursumme kontrolliert werden.

Auch zu dieser Regelstrategie liegen mittlerweile einige Praxiserfahrungen vor. Der theoretische Handlungsspielraum und damit