Anwendung Genetischer Algorithmen zur optimalen Steuerung des Gewächshausklimas

Hartmut Pohlheim, Ilmenau
Dr. Adolf Heißner, Großbeeren

Abstrakt

Die Verwendung Genetischer Algorithmen für die Berechnung der optimalen Steuerung eines komplexen dynamischen Systems wird am Beispiel der Steuerung der Zustandsgrößen in einem Gewächshaus dargestellt. Grundlage ist ein integriertes Modell (Gewächshausklima, Wachstum und Transpiration des Pflanzenbestandes) für die Vorhersage von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und CO_2-Konzentration im Gewächshaus in einem Zeitbereich von 15-60 Minuten (Kurzfristmodell).

Die Arbeit zeigt die Optimierung der Steuerung des Gewächshausklimas mit dem Ziel einer Maximierung des Gewinns unter Berücksichtigung von Beschränkungen (z.B. Verhinderung von Streß für die Pflanzen). Durch die Einbeziehung von aufgabenspezifischem Wissen in den Genetischen Algorithmus gelang es, wesentlich schneller und zu besseren Ergebnissen zu gelangen, als dies mit einem normalen genetischen Algorithmus möglich war. Es werden Ergebnisse der Optimierung für durchschnittliche Tage verschiedener Jahreszeiten sowie Optimierungsergebnisse bei sich ändernden Preisen gezeigt.

1 Einleitung

Die Effektivität der Pflanzenproduktion im Gewächshaus hängt entscheidend von der Einstellung optimaler klimatischer Wachstumsbedingungen zur Erzielung hoher Erträge bei niedrigem Aufwand, guter Qualität und geringer Umweltbelastung ab. Um dies zu erreichen, müssen gleichzeitig mehrere Einflußgrößen wie Temperatur, Luftfeuchte und CO_2-Konzentration in jedem Zeitpunkt entsprechend vorgegebenen Kriterien durch Heizen, Lüften, CO_2-Zufuhr u.a. optimal gesteuert werden. Da dieser sich ständig ändernde optimale Zustand in der gesamten Vegetationsperiode einzuhalten ist, ergibt sich eine hochdimensionale Optimierungsaufgabe.

Auf der Basis nichtlinearer Optimierungen mit Ertragsmodellen (Gurke, Tomate) wurden für Diskretisierungsintervalle von mehreren Tagen beispielsweise in [1], [3] und [7] Lösungen vorgestellt. Es handelt sich hierbei um dynamische Langfriststeuerungen, die durch entsprechende Steuerungen im Kurzfristbereich (Minuten, Stunden) zu ergänzen sind. Die Langfriststeuerung ist dabei die übergeordnete Steuerung, welche den pflanzenbaulich zulässigen Steuerungsbereich für die untergeordnete Kurzfriststeuerung vorgibt.

In dieser Arbeit wird eine auf einem einfachen Modell des Gewächshausklimas ([2]) beruhende Optimierung der Temperatur, Luftfeuchte und CO_2-Konzentration im Kurzfristbereich (15-60 Minuten) durch Anwendung modifizierter Genetischer Algorithmen vorgestellt.

Im Abschnitt 2 wird das Gewächshausklimamodell zusammen mit dem Pflanzenwachstumsmodell (hier Tomate) beschrieben. Auf die Simulation und Optimierung wird im Abschnitt 3 eingegangen, speziell auf die Optimierung mit genetischen Algorithmen. Die durchgeführten Optimierungen und ihre Ergebnisse werden im Abschnitt 4 dargestellt. In Abschnitt 5 wird eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick auf weitere Entwicklungen gegeben.

2 Gewächshausklimamodell

Das Gewächshausklimamodell, Bild 1, beschreibt die Abhängigkeit der Temperatur, der Luftfeuchte und der CO_2-Konzentration im Gewächshaus von den Stellgrößen sowie den mikrometeorologischen Bedingungen im Freien mit einem System von 3 nichtlinearen Differentialgleichungen 1. Ordnung.

Die 3 Differentialgleichungen des Modells sind die Bilanzgleichungen im Gewächshausinnenraum für 1) Energie, Gl. 1, 2) Wasserdampf, Gl. 2 und 3) Kohlendioxid, Gl. 3.

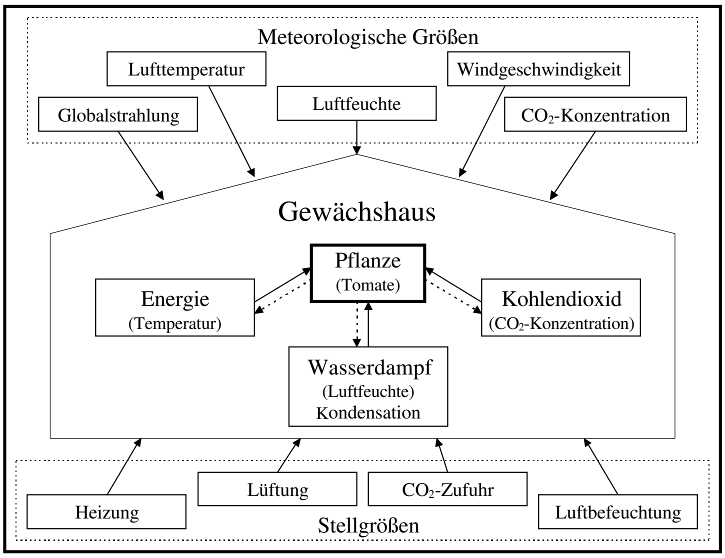

Bild 1: Schema des Gewächshausklimamodells

Das Gewächshausklima kann durch 4 Stellgrößen beeinflußt werden: 1) Heizung, *Q* [W/m²], 2) Lüftung, *LR* [m³/m²], 3) CO_2-Zufuhr, *W* [g/(m²·h)] und 4) Luftbefeuchtung, *RM* [g/(m²·h)].

Die zu messenden mikrometeorologischen Bedingungen im Freien sind 1) Globalstrahlung, *IGLOB* [W/m^2], 2) Lufttemperatur außen, *TEMA* [°C], 3) Luftfeuchte außen, *FA* [% r.F.], 4) CO_2-Konzentration außen, *CA* [ppm] und 5) Windgeschwindigkeit, *U* [m/s].

Im Gewächshausmodell wird nur ein Kompartiment betrachtet (Gewächshausinnenraum mit Pflanzenbestand). Deshalb müssen neben den Bedingungen im Freien weitere Eingangsgrößen berücksichtigt werden: 1) Temperatur der Bodenoberfläche, *TEMB* [°C] und 2) Temperatur der Gewächshaushülle, *TEMG* [°C].

Die in den Bilanzgleichungen verwendete Temperaturgröße ist durch die spezifische Wärmekapazität von Luft und Pflanzen (Volumen pro Grundfläche und Wasseräquivalent des Pflanzenbestandes) im Gewächshaus definiert und stellt damit ein Mittel aus Luft- und Pflanzentemperatur dar.

Die Berechnungen mit dem Modell benutzen eine Reihe von physikalischen Konstanten, Gewächshausparameter und -hilfsgrößen sowie Koeffizienten für die Darstellung der Transpiration und des CO_2-Gaswechsels durch Modelle und Pflanzenbestandsparameter ([2], [4]).

2.1 Zustandsgleichungen des Gewächshauses

2.1.1 Energiebilanz

Die sich aus der Energiebilanz, Bild 2, ergebende Temperaturänderung, *DTEMI* [K/s], wird durch folgende Komponenten dargestellt: 1) Wärmezufuhr durch Heizen, *Q*, 2) Erwärmung durch Globalstrahlung, *qglob*, 3) Änderung der Luftfeuchte, *DDDI*, 4) Energieaustausch mit der Umgebung durch Lüftung, *qluwe*, 5) Wärmedurchgang durch die Gewächshaushülle, *qduga*, 6) Wärmeübertragung an der Gewächshausbodenoberfläche, *qboden* und 7) Kondensation/Verdunstung von Wasser an der Gewächshaushülle, *qkonden*.

$$DTEMI=(1/(CG+GH\cdot CPD\cdot DDI))\cdot(Q+qglob-qluwe-qduga-qboden-qkonden-GH\cdot(VDW0+CPD\cdot TEMI)\cdot DDDI). \quad (1)$$

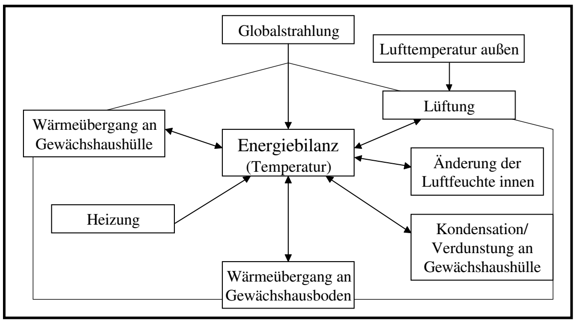

Bild 2: Schema der Energiebilanz

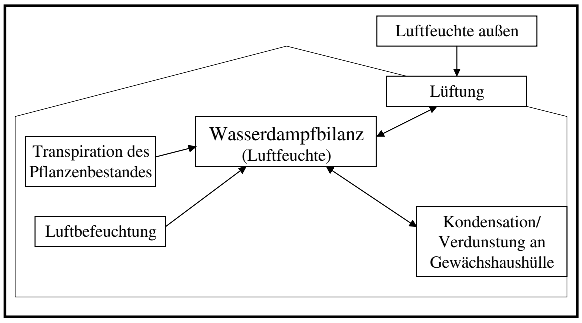

Bild 3: Schema der Wasserdampfbilanz

2.1.2 Wasserdampfbilanz

Die Dampfdichteänderung, *DDDI* [g/(m^3·s)], die sich aus der Wasserdampfbilanz, Bild 3, ergibt, wird durch folgende Komponenten dargestellt: 1) Transpiration des Pflanzenbestandes, *trans*, 2) Luftbefeuchtung, *lube*, 3) Wasserdampfaustausch mit der Umgebung durch Lüftung, *wadawe* und 4) Kondensation/Verdunstung an der Gewächshaushülle, *kondverd.*

$$DDDI=(1/(GH\cdot 3600))\cdot(trans+lube-wadawe-kondverd). \quad (2)$$

Kondensation (Verdunstung) tritt an der Gewächshülle auf, wenn der Funktionswert von *kondverd* positiv (negativ) ist. Bei Überschreiten der maximalen Kondensatflächendichte fließt Kondensat an der Gewächshaushülle ab. Ist kein Kondensat vorhanden wird *kondverd* zu 0 gesetzt (keine Verdunstung).

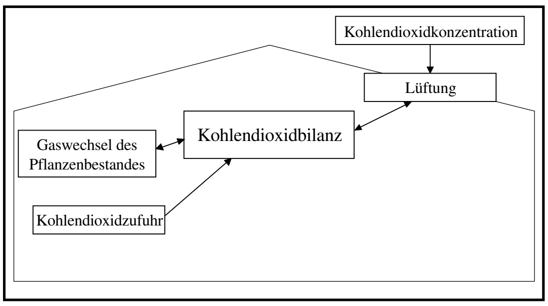

Bild 4: Schema der Kohlendioxidbilanz

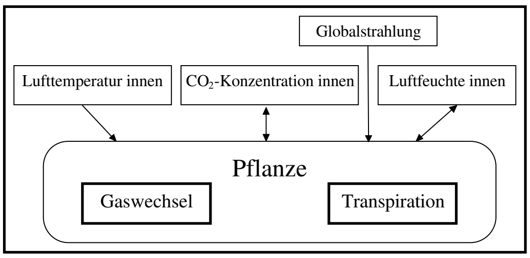

Bild 5: Schema des Pflanzenwachstumsmodells

2.1.3 Kohlendioxidbilanz

Die CO_2-Bilanz, Bild 4, aus der sich die Änderung der CO_2-Konzentration, *DCI* [ppm/s], ergibt, wird durch folgende Komponenten dargestellt: 1) CO_2-Zufuhr durch Begasung, *W*, 2) CO_2-Gaswechsel (Photosynthese und Respiration) des Pflanzenbestandes, *gaweblfl* und 3) CO_2-Austausch mit der Umgebung durch Lüftung, *kodiwe.*

$$DCI=(W-gaweblfl-kodiwe)\cdot(1/(10^{-6}\cdot DC\cdot GH\cdot 3600)). \quad (3)$$

2.2 Zustandsgleichungen des Pflanzenmodells (Tomate)

2.2.1 CO_2-Gaswechsel

Der auf die Blattfläche bezogene CO_2-Gaswechsel der Pflanzen, *gaweblfl* [g/(m²·h)], Bild 5, wird wie folgt berechnet:

$$gaweblfl=P_0\cdot FICT\cdot FSD. \qquad (4)$$

P_0 ist die CO_2-Gaswechselrate unter Standardbedingungen. Die Größe *FICT* wird mittels einer parametrischen Gleichung ermittelt:

$$FICT=\ C_1\cdot(1-exp(-C_2\cdot 0.5\cdot I))\cdot(1-exp(-C_3\cdot CI))\cdot(TEMI+C_4\cdot TEMI^2)-C_5\cdot(TEMI+C_6\cdot TEMI^2).$$

Die Größe *FSD* wird durch eine von 3 Gleichungen in Abhängigkeit des Wertes des Dampfdrucksättigungsdefizits innen, *SDI*, bestimmt:

$$SDI < SDIG_1 \qquad FSD=exp(EE_1\cdot(SDIG_1-SDI)^2)$$
$$SDIG_1 \le SDI \le SDIG_2 \qquad FSD=1$$
$$SDI > SDIG_2 \qquad FSD=exp(EE_2\cdot(SDIG_2-SDI)^2)$$

2.2.2 Transpiration

Die auf die Blattfläche bezogene Transpiration der Pflanzen, *trblfl* [g/(m²·h)], Bild 5, ergibt sich aus:

$$trblfl=\ V_0\cdot VREL. \qquad (5)$$

V_0 ist die Transpirationsrate unter Standardbedingungen. Die Größe *VREL* wird durch 3 parametrische Gleichungen berechnet:

$$VREL=VRELC\cdot SDI\cdot(B_1+B_2\cdot I+B_3\cdot I^2\ +B_4\cdot(PDI/PSI)\cdot 100)/VSTAN,$$
$$VRELC=1-B_0\cdot(CI-600),$$
$$VSTAN=10\cdot(B_1+B_2\cdot 300+B_3\cdot 300^2+B_4\cdot 60).$$

2.3 Biomasse und Gewinn

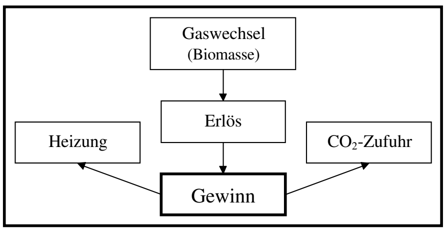

Bild 6: Schema der Gewinnberechnung

Der Gewinn, *GEWI* [0.01 DM/(m²·h)], Bild 6, wird aus folgenden Komponenten bestimmt: 1) Biomasse, *BIOM*, 2) Gemüsepreis, PR_1, 3) Kosten der CO_2-Zufuhr, PR_2, und 4) Kosten für Heizung, PR_3.

Die Biomasse, *BIOM*, ist die aus dem CO_2-Gaswechsel der Pflanzen, *gaweblfl*, berechnete Trockensubstanzproduktion, die durch Multiplikation mit dem Anteil am Ertrag (50%) und durch Division mit dem Trokkensubstanzgehalt (5%) in eine Ertragsgröße, *Ertrag*, und nachfolgend durch Multiplikation mit dem Gemüsepreis in eine Erlösgröße, *GEWI*, umgerechnet wird. Die Kosten für die CO_2-Zufuhr werden aus dem CO_2-Preis errechnet. Analog erfolgt die Berechnung der Kosten der Wärmezufuhr durch Heizen über den Energiepreis für Heizöl.

$$GEWI = Ertrag\cdot PR_1 - W\cdot PR_2 - Q\cdot PR_3. \qquad (6)$$

Komponenten	Symbol	Einheit	Funktion / Wert
Biomasse	*BIOM*	$g/(m^2 \cdot h)$	*gaweblfl*·(30/44)
Ertrag	*Ertrag*	$g/(m^2 \cdot h)$	*BIOM*·0.5/0.05
Gemüsepreis	PR_1	0.01 DM/g	0.3
CO_2-Preis	PR_2	0.01 DM/g	0.1
Energiepreis	PR_3	0.01 DM/(W·h)	0.005

Tab. 1: Komponenten der Berechnung des Gewinns

2.4 Beschränkungen

Die Beschränkungen der Stellgrößen sind durch die Grenzen der Wertebereiche der Steuerungsvariablen definiert: Heizung/Wärmezufuhr [0...150 W/m^2]; Lüftung [2…100 $m^3/(m^2 \cdot h)$] und CO_2-Zufuhr [0...10 $g/(m^2 \cdot h)$]. In dieser Untersuchung ist eine Luftbefeuchtung nicht vorgesehen.
Die Zustände des Gewächshausklimas sind zur Vermeidung von Streß für die Pflanzen und zur Einhaltung von Randbedingungen, die sich aus langfristigen Strategien ergeben, beschränkt. Vorgenommen wird eine Beschränkung der Temperatur im Gewächshaus: $16°C < TEMI < 24°C$.

2.5 Simulation

Das Gewächshausklimamodell ist als System von Differentialgleichungen (DGL) gegeben. Mit den bekannten Werten der Variablen des DGLS zum Beginn des Zeitraums hat das DGLS eine Lösung zu jedem späteren Zeitraum. Die Simulation/Integration entspricht der Lösung dieses Differentialgleichungssystems (DGLS) über den interessierenden Zeitraum.
Für die Integration des vorliegenden Modells wurde ein Runge-Kutta-Verfahren 4. Ordnung verwendet.

3 Beschreibung des Optimierungsalgorithmus

3.1 Überblick zu Genetischen Algorithmen

Für das Gewächshausklimamodell soll der Verlauf einer Steuerung unter Beachtung der Zustandsgleichungen ermittelt werden. Damit kommen Methoden der dynamischen Optimierung zur Anwendung, d.h., es wird eine optimale Steuerung in einem bestimmten Zeitintervall gesucht.
Für die Optimierung wurden genetische Algorithmen verwendet, einer Alternative zu deterministischen Optimierungsverfahren. Genetische Algorithmen unterscheiden sich von den deterministischen Suchverfahren (z.B. Gradientensuchverfahren) vor allem in der Art der Veränderung der Parameter/Variablen. Während Gradientensuchverfahren die Variablen nach deterministischen Regeln verändern, basieren genetische Algorithmen auf zufällig verteilten Regeln.
Dieser Abschnitt gibt eine kurze Einführung zu genetischen Algorithmen. Für eine tiefergehende Diskussion von genetischen Algorithmen sei auf [6] verwiesen
Genetische Algorithmen modellieren natürliche Prozesse, z.B. Populationen, Selektion, Rekombination, Mutation und Migration. Durch die Verwendung von Populationen von Individuen anstelle einzelner Lösungen wird die Suche in einer parallelen Art und Weise durchgeführt.

Zu Beginn der Berechnungen wird eine Anzahl von Individuen (die Population) zufällig initialisiert (jeder Variablen wird ein zufälliger Wert aus dem möglichen Intervall zugewiesen). Dann wird die Zielfunktion für diese Individuen berechnet. Damit ist die erste Generation produziert.

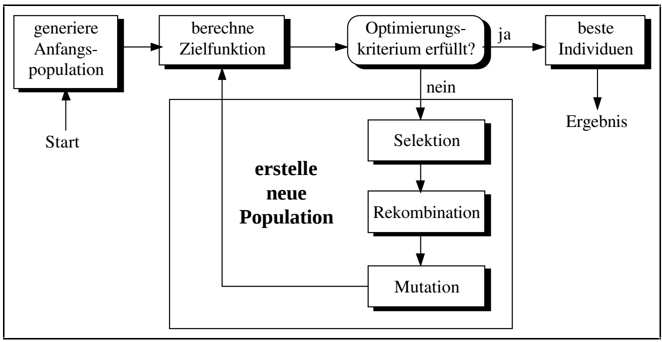

Bild 7: Grundstruktur eines genetischen Algorithmus

Individuen werden entsprechend ihrer Fitneß für die Produktion von Nachkommen ausgewählt. Immer zwei Eltern rekombinieren zur Produktion von zwei Nachkommen. Alle Nachkommen werden mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit mutiert und nachfolgend wird deren Fitneß berechnet. Die Nachkommen werden in die Population eingefügt und ersetzen die Eltern, womit eine neue Generation produziert ist. Diese Schleife wird solange durchlaufen, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist. Das beste gefundene Individuum ist die Lösung, das gefundene Optimum. Bild 7 zeigt die Struktur eines einfachen genetischen Algorithmus.

In der natürlichen Evolution tendieren Arten dazu, sich in Unterpopulationen der Gesamtpopulation fortzupflanzen, die bis zu einem gewissen Grad voneinander isoliert sind. Fortpflanzung zwischen Individuen verschiedener Unterpopulationen ist möglich, wahrscheinlicher ist aber, daß sich die Individuen innerhalb einer Unterpopulation fortpflanzen. Die Unterteilung in Unterpopulationen und die Migration verbessert die Ergebnisse gegenüber dem Algorithmus mit nur einer Population.

All Berechnungen wurden unter *MATLAB* mit der *Genetic Algorithm Toolbox for use with MATLAB* [6] durchgeführt. Für die Optimierungen wurde der *Multiple Population Genetic Algorithm* [6] benutzt. Dabei wurden die folgenden genetischen Operatoren und Parameter verwendet:

- lineares Ranking (Selektionsdruck: 2.0),
- truncation selection (elitest), generation gap 0.9,
- diskrete Rekombination,
- reelle Mutation (Breeder Genetic Algorithm), Mutationsrate: 1/Anzahl der Variablen pro Individuum,
- 4 Unterpopulationen mit jeweils 50 Individuen,
- uneingeschränkte Migration alle 20 Generationen.

Erste Untersuchungen mit der Verwendung konkurrierender Unterpopulationen fanden statt. Diese Experimente zeigten eine Verbesserung der Lösungen. Die Präsentation dieser Ergebnisse ist aber nicht Gegenstand dieses Beitrag.

3.2 Repräsentation der Individuen und Zielfunktion

Jedes Individuum im genetischen Algorithmus repräsentiert die Steuerung für eine Simulationsperiode. Wie in Abschnitt 2 gezeigt wurde, kann das Gewächshausklima durch 4 Größen gesteuert werden. Im Moment werden 3 Größen verwendet: Heizung, Lüftung und CO_2-Zufuhr. Luftbefeuchtung ist die gesamte Zeit auf 0 gesetzt.

Die Steuerungen werden zu äquidistanten Zeitpunkten diskretisiert. Für die Simulation wird ein Halteglied 1. Ordnung verwendet, um Werte der Steuerungsgrößen zwischen den Diskretisierungspunkten zu erhalten. Die Anzahl der Variablen kann mittels Gl. 7 berechnet werden:

$$NumVar = \left(\frac{SimTime}{ControlStep} + 1 \right) \cdot NumControl; \qquad \begin{array}{l} ControlStep = 0.25h \\ NumControl = 3 \end{array} \tag{7}$$

Ein Steuerungsschritt alle 15 Minuten ist für die Simulation klein genug und hält gleichzeitig die Anzahl der Variablen so klein wie vertretbar. Damit ergibt sich, daß für eine Simulationszeit von 2 Stunden ein Individuum aus 27 Variablen besteht.

Um die Anzahl der Variablen und die Optimierungszeiten handhabbar zu halten wird normalerweise eine Simulationsperiode von 2 Stunden verwendet. Zur Optimierung längerer Perioden wird die Optimierung in Abschnitte von 2 Sunden unterteilt. Die Endzustände der einen Simulation/Optimierung dienen dann als Startwerte für die folgende Periode. Damit ist es möglich, selbst sehr lange Simulationszeiträume auf Standardhardware (PC Pentium-66, 16 MB RAM) zu berechnen.

Die im Modell verwendete Zielfunktion, *Cost*, ist die Maximierung des Gewinns, Gl. 6, unter der Bedingung der Erfüllung der Beschränkungen, siehe Abschnitt 2.4. Um die Einhaltung der Beschränkungen zu erreichen, wird den Individuen ein Bestrafungswert (*Penalty*) zugewiesen, die die definierten Beschränkungen nicht einhalten. Da die Genetic Algorithm Toolbox bei der Optimierung mit einer Minimierung arbeitet, wird in Gl. 8 der Gewinn mit -1 multipliziert.

$$Cost = -\int_{T_S}^{T_E} GEWI\,dt + Penalty \tag{8}$$

Für die Bestrafungsfunktion, Gl. 9, kommt eine gewichtete Summe zur Anwendung. *Val* ist entweder eine der Zustandsvariablen des Gewächshausklimas oder eine Steuerungsgröße, *Constr* die jeweils dazugehörende Beschränkung. Durch Wahl der Gewichte *W* kann die Wichtigkeit der Einhaltung dieser Beschränkung definiert werden.

$$Penalty = \sum_{i=1}^{NumConstr} \left(W_i \cdot \int_{T_S}^{T_E} \left| \left(Val_i - Constr_i \right) > 0 \right| dt \right) \tag{9}$$

3.3 Einbeziehung von aufgabenspezifischem Wissen

Erste Optimierungen des Gewächshausklimamodells wurden ohne die Einbeziehung von problemspezifischen Heuristiken durchgeführt. Die Berechnungen können aber substantiell durch die Einbeziehung solchen spezifischen Wissens beschleunigt werden.

In einem einfachen genetischen Algorithmus geschieht die Initialisierung der Individuen zufällig verteilt im Wertebereich der jeweiligen Variablen. Hier wurde nachfolgend eine spezielle Initialisierungsfunktion verwendet. Die Initialisierung der Variablen wurde auf ein schmales Band des Wertebereiches eingeschränkt. Dieses Band wird durch heuristische Erfahrungen definiert, die auf durchschnittliche Wetterbedingungen der jeweiligen Tage beruhen. Während der Optimierung arbeiten die genetischen Operatoren (Rekombination, Mutation) weiterhin auf dem gesamten Wertebereich der Variablen.

Durch Verwendung dieser speziellen Initialisierung wurden bessere Lösungen für die Steuerungswerte berechnet und zudem in einer kleineren Anzahl von Generationen.

Im Moment untersuchen wir weitere Möglichkeiten der Einbringung speziellen Vorwissens. Eine ist die Änderung des Wertebereiches der Variablen in Abhängigkeit von der Jahreszeit. Z.B., im Winter ist der Wertebereich der Lüftung wesentlich kleiner als im Sommer - und umgekehrt für die Heizung. Dadurch könnte die Suche weiter eingeschränkt und die Führung für den genetischen Algorithmus weiter verbessert werden. Allerdings ist diese Variante sehr problemspezifisch und kann nicht generalisiert werden. Eine weitere Möglichkeit wäre die Verwendung anderer Heuristiken, die aus der Praxis bekannt sind. Wenn die Heizung hoch ist, macht Lüftung nicht viel Sinn. Dasselbe gilt für die CO_2-Zufuhr und umgekehrt.

All dies zeigt, daß der genetische Algorithmus nur ein Teil des Optimierungsalgorithmus ist. Insbesondere, wenn die Steuerung online eingesetzt werden soll und daraus Forderungen in Bezug auf Antwortzeiten erfüllt werden müssen, sollten alle Möglichkeiten zur Verbesserung der Steuerung und Beschleunigung der Optimierung genutzt werden.

4 Experimentelle Ergebnisse

Der erste Unterabschnitt zeigt die optimale Steuerung für typische Tage in den Monaten April und Juni. Danach wird die optimale Steuerung bei sich verändernden Energie- und CO_2-Preisen für Februar dargestellt.

Die verwendeten meteorologischen Wetterdaten in diesem Report sind Durchschnittswerte über 10 Jahre für Potsdam/Deutschland [4]. Deshalb sind diese Daten glatt und ohne Störungen.

Die Blattfläche pro Quadratmeter ist im Februar am kleinsten ($0{,}5m^2/m^2$) und im Juni am größten ($2{,}5m^2/m^2$).

4.1 Optimale Steuerung für durchschnittliche Tage

Dieser Unterabschnitt zeigt die Ergebnisse der Optimierungen des integrierten Gewächshausklimamodells für durchschnittliche Tage im April und Juni. Für die Berechnung des Gewinns wurden die Preise aus Tabelle 1 benutzt.

Das jeweils linke Diagramm zeigt die Verläufe der Zustandsvariablen des Gewächshauses: Luftfeuchtigkeit, *DDI*, Gl. 2, Temperatur, *TEMI*, Gl. 1, und CO_2-Konzentration, *CI*, Gl. 3. Die CO_2-Konzentration wurde zur Skalierung auf den Wertebereich der anderen beiden Variablen durch 100 dividiert. Die Verläufe von Biomasse, *BIOM*, und Gewinn, *GEWI*, Gl. 6, sind im mittleren Diagramm dargestellt (aufsummiert über die Zeit - cumulative sum). Die Biomasse wurde durch 100 dividiert, um mit dem Gewinn in einem Diagramm dargestellt werden zu können. Das rechte Diagramm zeigt die Verläufe der 3 Stellgrößen: Heizung, *Q*, Lüftung, *LR* und CO_2-Zufuhr, *W*, wobei die Werte der CO_2-Zufuhr mit 10 multipliziert wurden.

Im April, Bild 8, ist die Heizung die gesamte Nacht an. Dadurch wird die Einhaltung der unteren Temperaturschwelle von 16°C gesichert. Während des Tages ist die Heizung nicht notwendig. Die Lüftung wird nur über die Mittagszeit in geringem Maße benutzt, wodurch die Temperatur unter der oberen Schwelle von 24°C gehalten wird. Da die Lüftung den gesamten Tag über recht gering oder ausgeschaltet ist, wird ständig Kohlendioxid zugeführt, wodurch die CO_2-Konzentration tagsüber hoch gehalten wird.

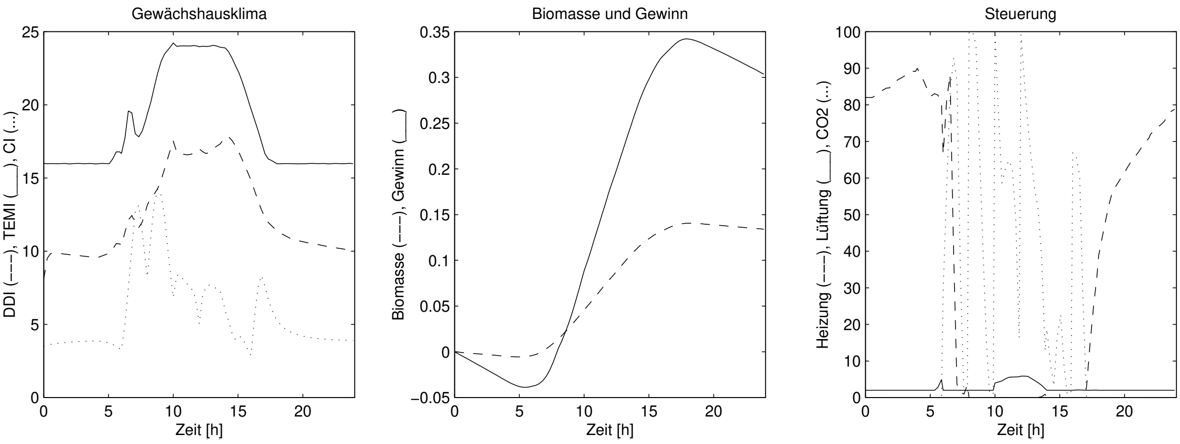

Bild 8. Ergebnisse der Optimierung für April

Im Juni, Bild 9, ist das Ergebnis ein ganz anderes. Die Lüftung ist den gesamten Tag an, um die Temperatur niedrig zu halten. Die Lüftung ist sogar höher, als es zur Einhaltung der oberen Temperaturschwelle von 24°C notwendig wäre. In Simulationen (hier nicht dargestellt) konnte gezeigt werden, daß eine Temperatur von etwa 20°C besser für das Biomasseproduktion im Juni ist als 24°C. Am Morgen, wenn die Lüftung noch ausgeschaltet ist, aber die Sonne bereits scheint (Sonnenaufgang etwa gegen 4 Uhr), wird Kohlendioxid zugeführt, um die CO_2-Konzentration zu erhöhen. Dies führt zu einer stärkeren Biomasseproduktion. Sobald die Lüftung zur Einhaltung der oberen Temperaturschwelle geöffnet wird, ist CO_2-Anreicherung nicht länger sinnvoll. Die Heizung wird nur während der Nacht in geringem Maße benutzt, damit die untere Temperaturschwelle von 16°C eingehalten wird.

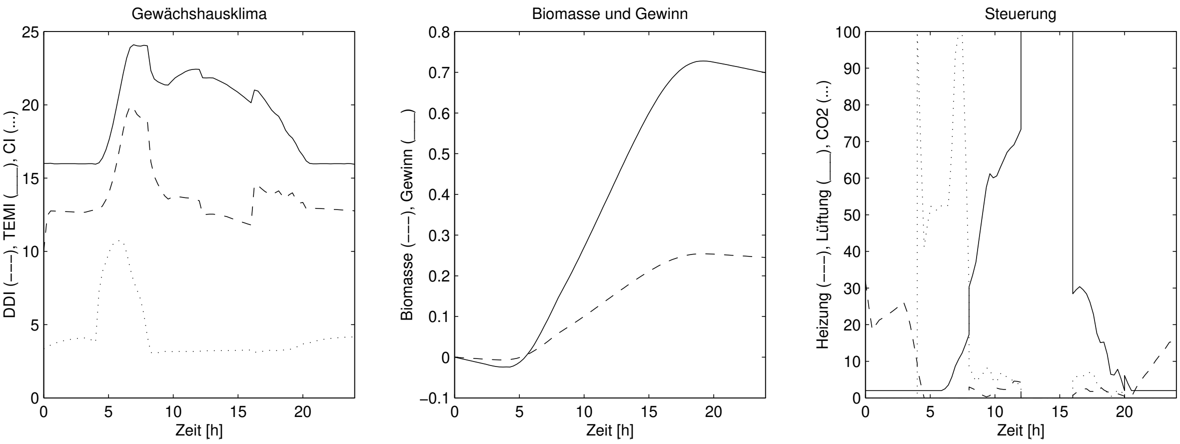

Bild 9. Ergebnisse der Optimierung für Juni

4.2 Optimale Steuerung bei veränderten Preisen

Bis jetzt wurde mit konstanten Preisen gerechnet. Für das folgende Experiment wurde der Preis für Heizung (Energie) und die CO_2-Zufuhr gegenüber dem Standardpreis verändert. Abhängig von der Größe der Änderung kann sich der Verlauf der Stell- und Zustandsgrößen nur etwas oder stark verändern.
Da die verwendeten Wetterdaten Durchschnittswerte und damit glatt und ohne Störungen sind, wurden hier zwei drastische Änderungen der Preise eingesetzt, um die Auswirkungen zeigen zu können.

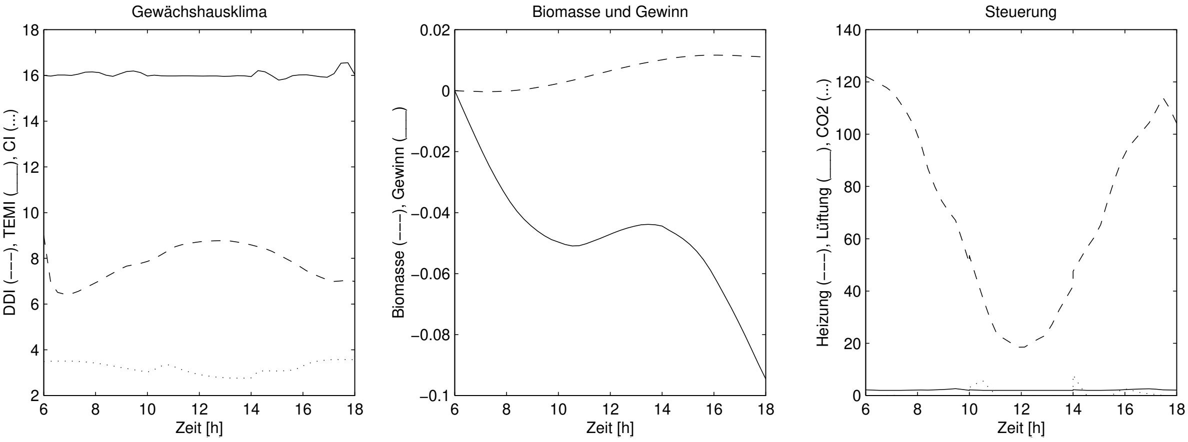

Bild 10. Ergebnisse der Optimierung für Februar unter Verwendung eines hohen Energie- und Kohlendioxidpreises

Bei den in Bild 10 gezeigten Ergebnissen waren der Energie- und Kohlendioxidpreis 3 mal so hoch wie der Standardpreis aus Tabelle 1. Im Ergebnis ist die Heizung so gering wie möglich, um trotzdem noch die untere Temperaturbeschränkung einzuhalten. Während des Tages wird so gut wie kein Kohlendioxid zugeführt, die Lüftung wird nie eingeschaltet.

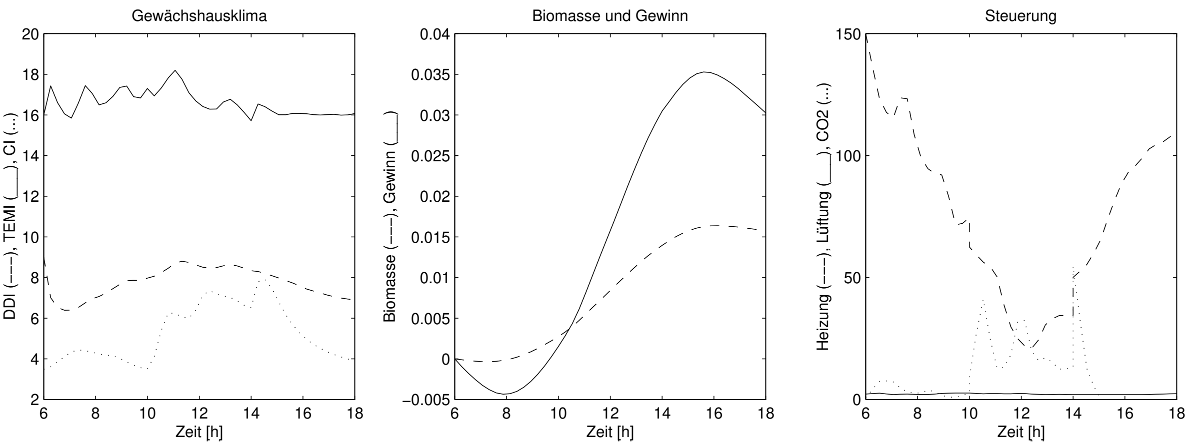

Bild 11. Ergebnisse der Optimierung für Februar unter Verwendung eines niedrigen Energie- und Kohlendioxidpreises

Bei der Verwendung eines niedrigen Energie- und Kohlendioxidpreises ($^1/_3$ des Standardpreises aus Tabelle 1), Bild 11, ergibt sich ein anderes Bild. Hier ist die Heizung höher, als es die Einhaltung der unteren Temperaturbeschränkung erfordert. Zusätzlich wird während des Tages Kohlendioxid zugeführt. Die produzierte Biomasse (BIOM=1,5 g/m²)) ist höher verglichen mit der unter erhöhten Preisen erreichten Biomasseproduktion (BIOM=1,1 g/m²)). Durch die niedrigeren Preise ist der Gewinn viel größer und positiv.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Wie die am Beispiel der Steuerung des Gewächshausklimas durchgeführten Untersuchungen zeigen, ergeben sich für die Optimierung komplexer Systeme durch Verwendung genetischer Algorithmen Vorteile.

Die ermittelten Steuerstrategien für Heizung, Lüftung und CO_2-Anreicherung zur Einstellung optimaler Klimazustände im Gewächshaus in Abhängigkeit von der Jahreszeit und den Preisen stehen im Einklang mit der Erfahrung und theoretischen Erkenntnissen.
Eine Weiterentwicklung der zugrunde gelegten Optimierungsmethode und die gezielte Anwendung auf spezifische Aufgaben der Gewächshausklimasteuerung ist somit gerechtfertigt.
Der Vorzug des verwendeten Optimierungsalgorithmus gegenüber klassischen Methoden ist vor allem in der einfachen Handhabbarkeit zu sehen. Dieses ist vor allem darin begründet, daß eine Anpassung an die Optimierungsaufgabe bzw. das zugrunde gelegte Modell (z.B. Klimamodell des Gewächshauses) weitestgehend entfallen kann. Das erleichtert dem Anwender die Nutzung.
Für eine Online-Optimierung muß allerdings weiter versucht werden, die gegenwärtigen Rechenzeiten (15-30 Minuten für ein Optimierungsintervall von 2 Stunden) zu reduzieren. Möglichkeiten dazu werden u.a. in der Weiterentwicklung der Algorithmen, z.B. durch Verwendung konkurrierender Unterpopulationen und Entwicklung problemspezifischer Rekombinations- und Mutationsoperatoren, gesehen.
In weiteren Untersuchungen sind insbesondere Szenarienrechnungen mit realen Wetterdaten der gesamten Vegetationszeit geplant. Hierbei sollen Strategien bei Vorgabe unterschiedlicher Optimalitätskriterien und Beschränkungen, z.B. durch Einbeziehung übergeordneter Langfristmodelle des Wachstums, gegenübergestellt werden.
Weiterhin wird eine Verbesserung der Pflanzenmodelle (CO_2-Gaswechsel, Transpiration, Wachstum) für notwendig erachtet.

Literatur

[1] Arnold, E.: Zur optimalen Steuerung zeitdiskreter dynamischer Prozesse mittels nichtlinearer Optimierung mit Anwendungen auf die Klimasteuerung von Gewächshäusern. Dissertation, Technische Hochschule Ilmenau, 1987.

[2] Heißner, A.: Ein einfaches Gewächshausklimamodell für die Kurzfriststeuerung von Temperatur, Luftfeuchte und CO_2-Konzentration. erscheint in: Gartenbauwissenschaft, 1996.

[3] Markert, A.: Aggregation pflanzenphysiologischer Wachstumsmodelle und Berechnung von Steuerstrategien für das Gewächshausinnenklima mittels Verfahren der nichtlinearen Optimierung, Dissertation, Technische Hochschule Ilmenau, 1990.

[4] Pohlheim, H. und Heißner, A.: Optimale Steuerung der Zustandsgrößen im Gewächshaus mit Genetischen Algorithmen: Grundlagen, Verfahren und Ergebnisse. Technischer Bericht, pohlheim@systemtechnik.tu-ilmenau.de, 1996.

[5] Pohlheim, H.: Ein genetischer Algorithmus mit Mehrfachpopulationen zur Numerischen Optimierung. at-Automatisierungstechnik 3 (1995), pp. 127-135, Berlin, 1995.

[6] Pohlheim, H.: Genetic Algorithm Toolbox for use with Matlab - Documentation. Technischer Bericht, pohlheim@systemtechnik.tu-ilmenau.de, 1995.

[7] Schmidt, M.: Bestimmung optimaler klimatischer Wachstumsfaktoren von Gewächshauskulturen auf der Basis pflanzenphysiologischer Beschreibungsmodelle. Dissertation, Technische Hochschule Ilmenau, 1985.