

Entwicklung eines Pflanzenwachstumsmodells zur Berücksichtigung des Einflusses der Klimaänderung auf die Qualität von agrarischen Kulturpflanzenarten

Christian Biernath¹, Sebastian Gayler¹, Petra Högy²,
Andreas Fangmeier² und Eckart Priesack¹

Einleitung

Der sich in den letzten Jahrzehnten beschleunigende Klimawandel zeigt sich durch höhere mittlere Temperaturen und einen Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration [CO₂]. Darüber hinaus nehmen Änderungen der Häufigkeit, Dauer und Stärke von Niederschlagsereignissen und Klimaextremen zu (IPCC 2007). Dieser Wandel wird sich ohne Zweifel auf Erträge und Qualität von Nutzpflanzen auswirken. Während die Auswirkungen des [CO₂]-Anstiegs auf den Ertrag von Kulturpflanzenarten vielfach untersucht sind (Amthor 2001), ist über deren Auswirkungen auf die Ertragsqualität bisher wenig bekannt (Stafford 2007). Während Hitzestress (z.B. bei Weizen) die Proteinzusammensetzung während der Kornfüllung verändert, führt eine höhere [CO₂] zu geringeren N-Konzentrationen im Blatt und einem höheren C/N Verhältnis im Korn (Webber et al. 1994, Fangmeier et al. 1999). Die Frage, wie die Auswirkungen des Klimawandels auf pflanzeninterne Transport- und Transformationsprozesse von Inhaltsstoffen (z.B. Mikro- und Makronährstoffe oder Assimilate) und auf Qualitätsparameter des Ernteguts (z.B. C/N-Verhältnis des Ernteguts) zu modellieren sind, ist bisher nicht gelöst. Dieses Wissen ist jedoch nötig, um die Qualität zukünftiger Ernten abzuschätzen.

Im vorliegenden Beitrag werden Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung existierender Modelle zur Photosynthese und Nährstoffallokation dargestellt. Diese ermöglichen es, Veränderungen der biochemischen Zusammensetzung der pflanzlichen Biomasse und der Ertragsqualität durch den Anstieg der [CO₂] und der Veränderung weiterer Klimafaktoren (z.B. Temperatur und Niederschlag) während der Vegetationsperiode in einem prozessorientierten Boden-Pflanze-Atmosphären-Modell zu beschreiben. Ziel ist es, die verbesserten Modellansätze in das Pflanzenmodell GECROS (Genotype-by-Environment interaction on CROp growth Simulator) zu integrieren, welches als Teilmodell im Agrarökosys-

¹ Helmholtz Zentrum München Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt, Ingolstädter Landstraße 1, 85746 Neuherberg. Inst. f. Bodenökologie, AG Modellierung System Boden-Pflanze, Tel.: 089-3187-3376, christian.biernath@helmholtz-muenchen.de

² Universität Hohenheim, Inst. f. Landschafts- und Pflanzenökologie, Fg. Pflanzenökologie und Ökotoxikologie, August-v.-Hartmannstr. 3, 70599 Stuttgart

temmodell EXPERT-N implementiert wurde (Priesack & Bauer 2003, Priesack 2006), um die Simulationsergebnisse mit Versuchsdaten von Sommerweizen unter kontrollierten – und Freilandbedingungen (Mini-FACE) zu überprüfen.

Die Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf Kulturpflanzenarten ist Teil des DFG-finanzierten Verbundprojektes „Regionaler Klimawandel“, dessen Ziel es ist die Folgen des globalen Klimawandels für die Funktion und Struktur von Agrarlandschaften auf regionaler Skala zu untersuchen und unter Berücksichtigung verschiedener sozioökonomischer Szenarien und Anpassungsprozesse Prognosen für ihre Entwicklung bis zum Jahr 2030 abzuleiten.

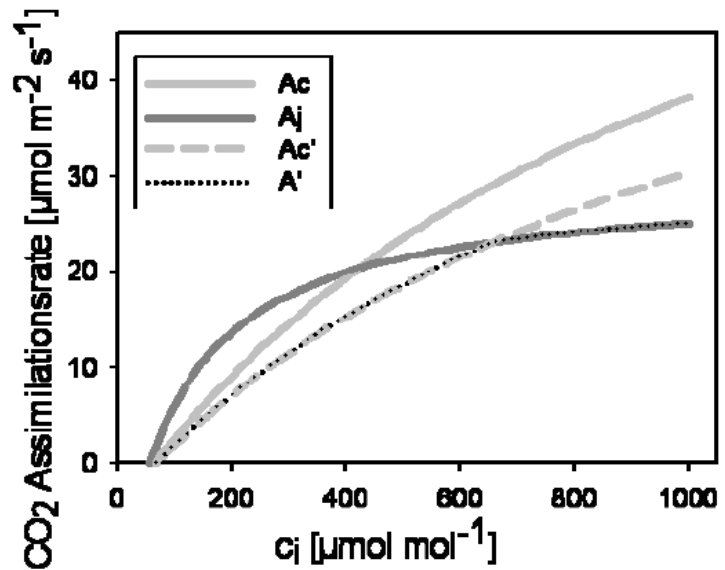
Physiologische Grundlagen

Im Fokus der Modellierung der Folgen des Klimawandels auf die Ertragsqualität von agrarischen Kulturpflanzenarten steht die Akklimation der Photosynthese an die steigende [CO₂].

Einen möglichen Ansatzpunkt für die Modellierung bietet die Licht-N-Hypothese. Diese besagt, dass die Photosynthese des Bestandesblätterdachs maximiert wird, wenn Sonnenblätter einen höheren N-Gehalt pro projizierter Fläche (N_{area}) haben als Schattenblätter, da Sonnenblätter eine höhere photosynthetisch aktive Photonen-flussdichte (PPFD) empfangen (Jarvis 1993). Diese Hypothese basiert u.a. auf der positiven Korrelationen zwischen N_{area} und Photosyntheseraten bei Lichtsättigung (Evans 1989) und wird durch die Beobachtung, dass die N-Verteilung von N_{area} pro-portional zur PPFD ist, weiter fundiert (Niinemets 1995). Berechnungen von Hirose & Werger (1987) zeigen, dass die tägliche Assimilation des Blätterdachs durch eine uneinheitliche N-Verteilung über N_{area} um mindestens 23% erhöht wird.

In Konkurrenz mit ihren Nachbarpflanzen um Licht und/oder um die photosynthetisch aktive Blattfläche zu maximieren, wächst die Pflanze und bildet neue Blätter. Wachstumsbedingt ist der Bedarf an Nährstoffen im oberen, jüngsten Blatt am höchsten. Gleichzeitig ist der Nährstoffbedarf in den schon ausgewachsenen aber voll bestrahlten Sonnenblättern der Pflanze ebenfalls hoch. Die ältesten Blätter am Grund des Blätterdachs werden dann wachstumsbedingt (sowie durch Bestandskonkurrenz) zunehmend stark beschattet, so dass deren Photosyntheseleistung absinkt und auch weniger photosynthetisch aktiver N dort benötigt wird. Folglich kommt es zu einer Umverlagerung der Nährstoffe innerhalb der Pflanze hin zu den jungen Blättern, bzw. gegen Ende der Vegetationsperiode in die Speicherorgane der Pflanze (Samen). Die insgesamt über die Vegetationsperiode aufgenommenen, für die Photosynthese notwendigen Mineralstoffe und hergestellten Assimilate limitieren somit auch deren Gehalt in den Samen.

Abb. 1: Bei der Erhöhung der $[CO_2]$ kommt es durch Akklimation zu einer Reduktion der CO_2 -limitierten Photosyntheserate ($A_c \rightarrow A_c'$). Im Bereich hoher $[CO_2]$ im Blatt ist die Sättigung von RubisCO limitierend für die Photosyntheseleistung (RubisCO-limitierte Photosyntheserate, A_j). Daraus resultiert eine geringere Netto- CO_2 -Assimilationsrate nach der Akklimation an erhöhte $[CO_2]$ (A'). Es sind $A_c = CO_2$ -limitierte Photosyntheserate, $A_j =$ RubisCO-limitierte Photosyntheserate, $A_c' = A_c$ nach der Akklimation an erhöhte $[CO_2]$, $A' =$ Netto- CO_2 -Assimilationsrate nach der Akklimation und $c_i = [CO_2]$ im Blatt.



Modellansatz

In den meisten Wachstumsmodellen für Kulturpflanzen basiert die Photosyntheserate auf einer schiefwinkligen hyperbolischen (non-rectangular hyperbolic) Funktion, wobei die Photosynthese vom Lichteinfall auf die Oberfläche der oberen Blätter abhängt (Thornley 1998a, b). Nur in wenigen Modellen wurden die Photosynthesemodelle durch einen biochemischen Ansatz erweitert (Farquhar et al. 1980), der den Effekt (response curve) der lichtgesättigten CO_2 -Aufnahmerate im Zusammenhang mit der $[CO_2]$ in den Blättern beschreibt (Abb. 1).

Dieser Ansatz berücksichtigt interaktive Effekte mit Umweltfaktoren auf die Photosynthese und wird von Pflanzenwachstumsmodellen benötigt, um Langzeitwirkungen eines sich verändernden globalen Klimas abzuschätzen.

Die Akklimation der Photosynthese an steigende $[CO_2]$ kann durch den Transfer von N weg von der photosynthetischen Primärreaktion (Bindung des CO_2 an die Rubis-CO) zunächst zu anderen geschwindigkeitslimitierenden Prozessen im Blatt (Elektronentransport, Triose-phosphat-Regeneration), aber auch in andere Pflanzenorgane beschrieben werden (Webber et al. 1994). Eine erhöhte $[CO_2]$ steigert die C-Substratmenge, die der Pflanze für das Wachstum zur Verfügung steht. Folglich wird auch die Senke für benötigtes N-Substrat bezüglich des Wachstums erhöht. Hierdurch wird die Syntheserate von photosynthetisch aktivem N reduziert (Reduktion der RubisCO-Menge) und somit auch die photosynthetisch aktive N-Konzentration im Blatt. Die Konsequenz ist eine reduzierte Photosyntheserate (Abb. 1).

Grundlage und Ausgangspunkt der hier beschriebenen Modellentwicklung bildet das mechanistisch-physiologische Kulturpflanzenwachstumsmodell GECROS

(Yin & van Laar, 2005), welches auf dem Photosynthesemodell von Farquhar basiert. Das Modell verwendet robuste Algorithmen, um individuelle physiologische Prozesse sowie deren Interaktionen und Rückkopplungsmechanismen zu beschreiben. Das Hauptaugenmerk liegt auf interaktiven Aspekten des Pflanzenwachstums, der Kopplung von Photosynthese und stomatärer Leitfähigkeit, den C-N-Interaktionen auf den Blattflächenindex, die funktionale Balance zwischen Spross- und Wurzelaktivitäten und dem Wechselspiel zwischen Quellen und Senken auf die Vorratsbildung und die Remobilisierung.

Die transparente Beschreibung der Modelltheorie und der frei verfügbare Quellcode ermöglichten die Implementierung in das Modell-Baukastensystem EXPERT-N. Dieses Modellsystem erlaubt es, bestehende Prozesse durch individuell veränderte Prozesse mit Hilfe von dynamic-link-libraries zu ersetzen.

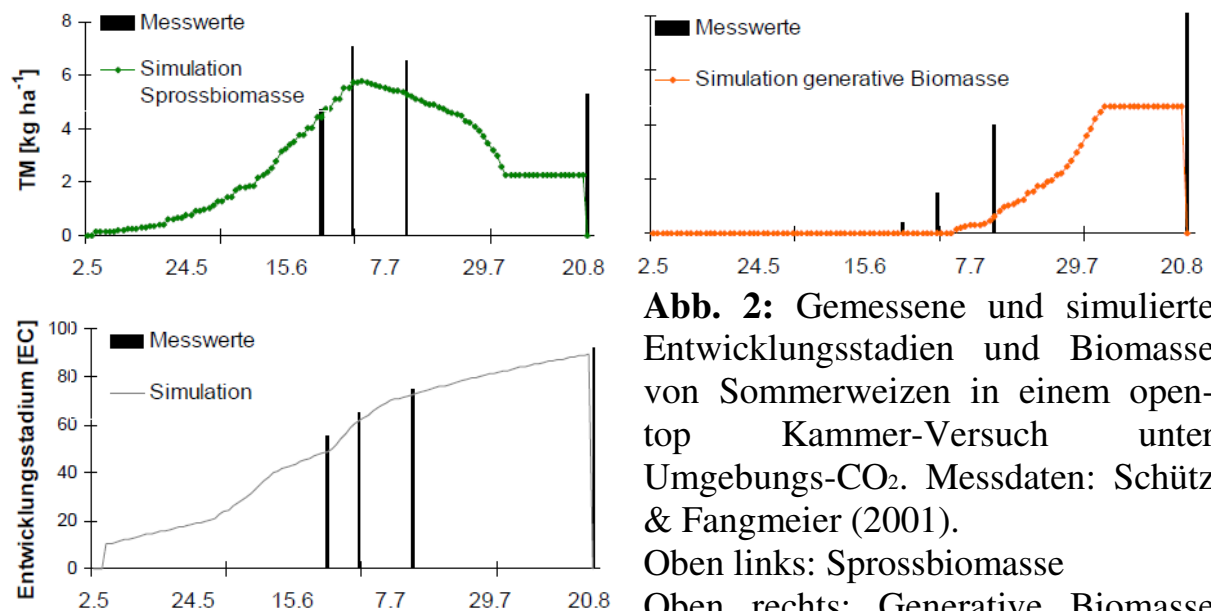


Abb. 2: Gemessene und simulierte Entwicklungsstadien und Biomasse von Sommerweizen in einem open-top Kammer-Versuch unter Umgebungs-CO₂. Messdaten: Schütz & Fangmeier (2001).

Oben links: Sprossbiomasse

Oben rechts: Generative Biomasse

Unten links: Entwicklungsstadien der Versuchspflanzen. TM = Trockenmasse.

Versuche und Daten

Die Überprüfung des neu zu entwickelnden Photosynthesemoduls soll einerseits auf bereits erhobenen und veröffentlichten Daten basieren (z.B. Fangmeier et al. 1999, Schütz & Fangmeier 2001) und andererseits auf Daten, die neu in Klimakammer- bzw. Freiland-Mini-FACE-Versuchen erhoben werden.

In Klimakammern wird Sommerweizen (*Triticum aestivum* L. cv. ‚Triso‘) in Pflanzcontainern (Höhe: 50 cm, Ø: 30 cm) in einer homogenisierten Boden/Sandmischung (Parabraunerde, getrocknet, gesiebt auf 2 mm; Quarzsand 0,3-0,8 mm) in einer Be-standesdichte von 360 Pflanzen m⁻² kultiviert. Der Versuchsaufbau beinhaltet ein vollfaktorielles Design, bestehend aus zwei CO₂-Konzentrationen in Kombination mit Hitze-/Trockenheitsstress während drei unterschiedlicher phänologischer Entwicklungsstadien.

Ein Teil der Modellbestände wird bei Erreichen der Entwicklungsstadien EC 31, 65 und 89 (Meier 1997) geerntet und in die Kompartimente Wurzel, Halm, Blatt, Fahnenblatt, Ähre bzw. Korn fraktioniert und auf Biomasse und Inhaltsstoffe analysiert.

Ergebnisse und Diskussion

Die vorläufige Simulation der phänologischen Entwicklung und Biomassebildung von Sommerweizen im Vergleich zu Daten der Kontrollvariante (Umgebungs-CO₂) aus einem open-top Kammer-Versuch (Fangmeier, persönliche Mitteilung) ist in Abb. 2 dargestellt. Die Simulation wurde unter den Bedingungen des Versuchs (Klima, Boden, Düngung) ohne weitere Kalibrierung des Modells durchgeführt.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das Pflanzenmodell prinzipiell geeignet ist, um das Wachstum von Sommerweizen aus open-top Kammer-Versuchen zu simulieren. Allerdings bedarf es noch einiger Anpassungen und Kalibrierungen des Freilandmodells GECROS an die speziellen Bedingungen der Versuchskammern. Die Entwicklungsstadien des Weizenbestandes werden vom Modell bereits mit hoher Genauigkeit getroffen, während die Bildung der Spross- und generativen Biomasse vom Modell zumeist unterschätzt wird. Ein Grund für die deutliche Unterschätzung der generativen Biomasse in der frühen Entwicklungsphase ist, dass in EXPERT-N als Frucht lediglich Körner berechnet werden, während bei der Datenerhebung auch strukturelle Ährenbestandteile miterfasst wurden. Insgesamt zeigt sich, dass die Modellpflanzen zu früh in die Seneszenz übergehen, woraus eine Biomassezuwachsdepression schon im August resultiert.

Literatur

- Amthor, J.S. 2001: Effects of elevated CO₂ concentrations on wheat yield: review of results from ex-periments using various approaches to control CO₂ concentration. *Field Crop Research* 73: 1-34.
- Evans J.R. 1989: Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C₃ plants. *Oecologia* 78: 9–19.
- Fangmeier, A.; De Temmerman, L.; Mortensen, L.; Kemp, K.; Burke, J.; Mitchell, R.; van Oijen, M. und H.-J. Weigel 1999: Effects on nutrients and on grain quality in spring wheat crops grown under elevated CO₂ concentrations and stress conditions in the European, multiple-site experiment 'ESPACE-wheat'. *European Journal of Agronomy* 10: 215–229.
- Farquhar, G.D.; von Caemmerer, S. und J.A. Berry 1980: A Biochemical Model of Photosynthetic CO₂ Assimilation in Leaves of C₃ species. *Planta* 149:78-90.
- Hirose, T. und M.J.A. Werger 1987: Maximising daily canopy photosynthesis with respect to the leaf nitrogen allocation pattern in the canopy. *Oecologia* 72: 520–526.
- IPCC 2007: *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 1009 Seiten.

- Jarvis, P.G. 1993: Prospects for bottom-up models. In: *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*. Eds: Ehleringer J.R., Field C.B. pp. 115–126. Academic Press, San Diego, CA.
- Meier, U. 1997: *Growth stages of mono- and dicotyledonous plants*. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin/Wien, 622 pp.
- Niinemets, Ü. 1995: Distribution of foliar carbon and nitrogen across the canopy of *Fagus sylvatica*: adaptation to a vertical light gradient. *Acta Oecologia* 16: 525–541.
- Priesack, E. 2006: *Expert-N Dokumentation der Modellbibliothek – FAM-Bericht 60*. Forschungsverbund Agrarökosysteme München - Erfassung, Prognose und Bewertung nutzungsbedingter Veränderungen in Agrarökosystemen und deren Umwelt. Hyronimus Buchproduktions GmbH München, Germany.
- Priesack, E. und C. Bauer 2003: *Expert-N Datenmanagement – FAM-Bericht 59*. Forschungsverbund Agrarökosysteme München - Erfassung, Prognose und Bewertung nutzungsbedingter Veränderungen in Agrarökosystemen und deren Umwelt. Hyronimus Buchproduktions GmbH München, Germany.
- Schütz, M. und A. Fangmeier 2001: Growth and yield responses of spring wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Minaret) to elevated CO₂ and water limitation. *Environ. Pollut.* 114: 187-194.
- Stafford, N. 2007: The other greenhouse effect. *Nature*, 448: 526-528.
- Thornley, J.H.M. 1998a. *Grassland Dynamics: An Ecosystem Simulation Model*. CAB International, Wallingford, Oxon OX10 8DE UK. xii + 241 Seiten.
- Thornley, J.H.M. 1998b: Dynamic model of leaf photosynthesis with acclimation to light and nitrogen. *Annals of Botany* 81: 421-430.
- Webber, A.N.; Nie, G.Y. und S.P. Long 1994: Acclimation of photosynthetic proteins to rising atmospheric CO₂. *Photosynthesis Research* 39: 413-425.
- Yin, X. und H.H. van Laar 2005: *Crop Systems Dynamics: An ecophysiological simulation model for genotype-by-environment interactions*. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, 155 pp.