

4.6 Mehr Kohlendioxid in der Atmosphäre: Wie reagieren Kulturpflanzen?

HANS-JOACHIM WEIGEL, REMY MANDERSCHIED,
ANDREAS FANGMEIER & PETRA HÖGY

Zusammenfassung: Mehr Kohlendioxid in der Atmosphäre: Wie reagieren Kulturpflanzen? - Die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre steigt seit ca. 150 Jahren deutlich und zunehmend schneller an und soll in ca. 50 Jahren bei Werten zwischen 480–600 ppm liegen. Für die Photosynthese von C₃-Pflanzen (z.B. Weizen, Reis, Soja, Gerste, Kartoffel) ist die gegenwärtige CO₂-Konzentration suboptimal. Diese Pflanzen reagieren daher auf ein höheres CO₂-Angebot mit zum Teil beträchtlichen Steigerungen der Photosynthese (PS). Bei Pflanzen des C₄-Typs (z.B. Mais, Hirse) wird aufgrund ihres anderen CO₂-Fixierungsmechanismus in der Regel keine PS-Stimulation beobachtet. Beide Pflanzentypen reagieren auf eine CO₂-Erhöhung gleichzeitig mit einer Verminderung der stomatären Leitfähigkeit bzw. der Blatttranspiration und damit der Wasserabgabe an die Atmosphäre. Dies verbessert die unmittelbare Wasserausnutzungseffizienz der Pflanze und kann damit z.B. auch Trockenheitseffekte abmildern. Bei C₃-Pflanzen wird unter CO₂-Anreicherung zudem meist eine Zunahme der löslichen Kohlenhydratfraktion sowie weiterer Kohlenstoffverbindungen im Gewebe festgestellt. Dies führt Veränderungen der chemischen Zusammensetzung vegetativer und generativer (Früchte, Samen) Pflanzenteile, wobei insbesondere eine Abnahme des Stickstoff- und damit verbunden des Proteingehaltes zu beobachten ist. Die möglichen Konsequenzen dieser Primäreffekte einer erhöhten CO₂-Konzentration für die Leistungsfähigkeit von Kulturpflanzen im Feld (z.B. Ertragsmenge und -qualität) bzw. für agrarökologische Zusammenhänge (z.B. Wasser- und Stoffhaushalt, Pflanzenkrankheiten) sind noch immer nicht vollständig verstanden. Zahlreiche CO₂-Anreicherungssexperimente (z.B. 550–700 ppm CO₂) mit den o.g. C₃-Pflanzenarten ergaben Wachstums- und Ertragsteigerungen (»CO₂-Düngeeffekt«) zwischen 10–30%. Im Hinblick auf die Pflanzenproduktion ist »CO₂-Düngeeffekt« bei der modellgestützten Folgenabschätzung des Klimawandels insgesamt die entscheidende Einflussgröße.

More Carbon Dioxide in the Atmosphere: how do crops respond? Along with overall climate changes the increasing concentration of atmospheric CO₂ ([CO₂]_e) will directly impact on agricultural crops and agroecosystems. [CO₂]_e is known to stimulate photosynthesis, to reduce leaf transpiration and to increase levels of carbohydrates in leaf tissue. Based on these physiological effects enhanced crop growth and yield (»CO₂ fertilization«) may occur. Concomitantly, [CO₂]_e may ameliorate soil water deficits, as canopy evapotranspiration of crops is reduced. Total biomass and yield of major crops like wheat, rice, potato, soybean, barley, cotton and ryegrass were enhanced by 10%-30% in numerous CO₂ exposure experiments (e.g. 550-700 ppm CO₂). On the other hand, crop quality may change, e.g. as reduced tissue nitrogen and protein levels, respectively, and changes in plant element stoichiometry under [CO₂]_e are frequently observed. A better assessment of the direct effects of [CO₂]_e on crop growth is crucial for any assessment of potential effects of future climate changes on food production.

Die Zunahme der Konzentration von Kohlendioxid (CO₂) in der Atmosphäre ist einerseits Ursache der vorausgesagten Klimaänderungen, andererseits beeinflusst sie auch direkt das Pflanzenwachstum. Die globale CO₂-Konzentration der Atmosphäre betrug über > 600.000 Jahre hinweg bis etwa zum Ende des 19. Jahrhunderts nie mehr als ca. 280–290 ppm. Seitdem steigt sie rasch an und beträgt zurzeit (März-2014) bereits ca. 400 ppm. Alle modellgestützten Emissions- und Klimaszenarien für die Zukunft stimmen darin überein, dass die CO₂-Emissionen weiter ansteigen und die atmosphärische CO₂-Konzentration in ca. 50 Jahren bereits bei ca. 470–600 ppm liegen wird (IPCC 2007). Neben seiner Wirkung als »Treibhausgas« ist CO₂ als Substrat der Photosynthese für das Wachstum

aller Pflanzen von fundamentaler Bedeutung. Eine Anreicherung der CO₂-Konzentration in der Umgebungsluft führt bei Pflanzen des sog. C₃-Typs in der Regel zu einer Stimulation der Photosynthese bzw. des Wachstums und beeinflusst den Wasserhaushalt und die Gewebezusammensetzung. Bei Pflanzen des C₄-Typs reagiert die Photosynthese kaum, jedoch wird auch hier der Wasserhaushalt verändert (s.u.). Diese direkten Wirkungen einer erhöhten CO₂-Konzentration sind von Bedeutung für die allgemeine Klimafolgenabschätzung in der Landwirtschaft. Szenarien zur Abschätzung der Folgen des Klimawandels insgesamt (Erwärmung, Trockenheit, Extremwetterereignisse) auf die regionale und globale Pflanzenproduktion bzw. die Landwirtschaft insgesamt basieren auf Modellen (Pflanzenwachs-

tums-, Ertrags-, Agroökosystem- bzw. ökonomische Modelle) mit unterschiedlichen Aggregationsebenen. Richtung und Ausmaß der Aussagen dieser Modelle zu möglichen Auswirkungen des Klimawandels werden entscheidend dadurch geprägt, ob und inwieweit die direkte CO₂-Wirkung (»CO₂-Dünge-Effekt«) berücksichtigt wird (MCGRATH & LOBELL 2013a). Eine möglichst genaue Kenntnis dieses Effektes auf Kulturpflanzen ist daher von entscheidender Bedeutung.

Methoden zur Untersuchung des CO₂-Dünge-Effektes

Zur Ermittlung der Auswirkungen einer erhöhten CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auf Kulturpflanzen werden neben geeigneten Pflanzenwachstumsmodellen insbesondere experimentelle Untersuchungen angewandt, in denen unterschiedliche CO₂-Konzentrationen simuliert werden. Dies geschieht z.B. in Klimakammern mit vollständiger Kontrolle aller Umweltvariablen, in modifizierten Gewächshäusern oder in Folientunneln und »Open-top-Kammern«, wobei die Pflanzen häufig

als Topfkulturen bzw. in Modellbeständen kultiviert werden. Aufgrund der verschiedenen Nachteile solcher mehr oder weniger künstlichen Wachstumsbedingungen (»Kammereffekte«; modifiziertes Wurzelwachstum etc.) sind kammerlose Freilandbegasungsanlagen (z.B. *Free Air Carbon Dioxide Enrichment* = FACE) entwickelt und eingesetzt worden, mit deren Hilfe etablierte Feldbestände unter realen landwirtschaftlichen Bedingungen ohne Entkopplung von der Atmosphäre und von dem freien Bodenvolumen mit CO₂ angereichert werden können (Abb. 4.6-1).

Pflanzenphysiologische Primärwirkungen einer CO₂-Anreicherung

Die unmittelbaren Effekte erhöhter CO₂-Konzentrationen auf pflanzenphysiologischer Ebene lassen sich drei Grundmustern zuordnen:

(1) Theoretische Überlegungen zeigen, dass C3-Pflanzen (hierzu gehören u.a. Weizen, Reis, Gerste, Kartoffel, Zuckerrübe, Raps, Sojabohne) auf eine CO₂-Anreiche-



Abb. 4.6-1: Ansicht eines FACE-Ringes (Durchmesser 20 m) in einem Winterweizenbestand in Braunschweig im Juni. Innerhalb der Ringfläche ist die atmosphärische CO₂-Konzentration auf 550 ppm erhöht. Teilflächen im Ring sind für physiologische Detailuntersuchungen beschatet bzw. für Bestandes-Photosynthesemessungen ausgerüstet.

runge (ca. 550–750 ppm) mit einer Steigerung der Photosyntheserate um bis zu 60% reagieren könnten. Diese Zunahme basiert vor allem darauf, dass das CO₂-fixierende Enzym Ribulose-1,5-bisphosphat-Carboxylase (RuBisCo) bei der gegenwärtigen CO₂-Konzentration nicht gesättigt ist. Eine erhöhte CO₂-Konzentration unterdrückt darüber hinaus die Photorespiration (Lichtatmung). Messungen der Photosyntheseraten auf Einzelblatt- oder Bestandesebene unter erhöhten CO₂-Atmosphären ergaben demgegenüber, dass die Stimulation der Photosynthese geringer ausfiel (ca. 30–40% Zunahme). Pflanzen des C4-Typs (hierzu gehören die heutigen Kulturpflanzen Mais, Hirse, Zuckerrohr), die sich in der Erdgeschichte an niedrige CO₂-Konzentrationen angepasst und einen anderen CO₂-Fixierungsmechanismus entwickelt haben, reagieren nicht bzw. nur sehr geringfügig mit einer Photosynthesestimulation (und bei ausreichender Wasserversorgung mit nur geringer Wachstumszunahme; s.u.) auf eine erhöhte CO₂-Konzentration. Ein der Photosynthesestimulation entsprechend hoher Biomasse- bzw. Ertragszuwachs wurde bei den meisten Pflanzenarten des C3-Typs (s.u.) allerdings nicht festgestellt. (2) Neben der Stimulation der Photosynthese bei C3-Pflanzen wird unter erhöhten CO₂-Konzentrationen sowohl bei C3- als auch bei C4-Pflanzen in der Regel eine Reduktion der Spaltöffnungsweite bzw. der stomatischen Leitfähigkeit festgestellt. Dadurch verbessert sich die unmittelbare Wasserausnutzungseffizienz, d.h. das Verhältnis der Menge des assimilierten CO₂ zur Menge des an die Atmosphäre abgegebenen Wassers (H₂O). (3) Eine CO₂-Anreicherung führt darüber hinaus bei C3-Pflanzen zu physiologischen Veränderungen u.a. im Photosyntheseapparat der Blätter. Als Folge davon kann sich z.B. das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff (C/N) des Gewebes ändern (TAUB & WANG 2008) bzw. eine generelle Veränderung der Stöchiometrie von Mineralstoffen bzw. Spurenelementen ergeben (s.u.). Für C4-Pflanzen sind CO₂-Effekte auf die Gewebeszusammensetzung nicht eindeutig.

Auf diese Primärwirkungen lassen sich alle Folgeeffekte erhöhter CO₂-Konzentrationen im Agrarökosystem zurückführen, die sowohl agronomische (z.B. Ertragsmenge und -qualität) als auch agrarökologische (z.B. Konkurrenzverhalten von Nutz-/Wildpflanzen; Pflanzenkrankheiten; Stoff- und Wasserhaushalt) Konsequenzen betreffen.

Bedeutung des CO₂-Anstiegs für die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion

Wasserhaushalt von Pflanzenbeständen

Es ist nachgewiesen worden, dass als Folge der o.g. Verminderung der Blatt-Transpiration auch die Was-

serabgabe bzw. die Evapotranspiration von Pflanzenbeständen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen abnehmen, d.h. C3- und C4-Pflanzen profitieren von einer CO₂-Erhöhung durch sparsameren Wasserverbrauch. Aufgrund dieser verminderten Evapotranspiration sind unter den Pflanzenbeständen, die in einer CO₂-angereicherten Atmosphäre wachsen, häufig erhöhte Bodenfeuchten festzustellen, was gleichermaßen für Pflanzen des C3- und des C4-Typs (Abb. 4.6-2) gilt. Dieser Effekt ist gekoppelt mit einer Steigerung der saisonalen Wasserausnutzungseffizienz der Biomasseproduktion (z.B. Kg Trockenmasse/Kg Wasser), die bei C3-Pflanzen aus einer CO₂-bedingten Stimulation der Photosynthese bzw. Trockenmassebildung und einer gleichzeitigen Reduktion der Evapotranspiration, bzw. bei C4-Pflanzen einer alleinigen Reduktion der Evapotranspiration, resultiert. Bei C4-Pflanzen wie Mais wird daher ein »CO₂-Dünge-Effekt« auf die Biomassebildung nur unter Wasserstressbedingungen beobachtet (Tab. 4.6-1). Diese CO₂-Wirkung auf den Wasserhaushalt von Pflanzenbeständen deutet darauf hin, dass in einem zukünftigen Klima die durch Bodentrockenheit bzw. Trockenstress erwarteten Wachstumsprobleme bei Kulturpflanzen abmildert werden könnten. Inwieweit dies zutrifft, ist derzeit noch nicht abschließend geklärt. Allerdings kann die verminderte Bestandstranspiration z.B. aufgrund der damit verbundenen Abnahme der transpiratorischen Kühlung zu einer Erwärmung der Blattoberflächen bzw. zu einem wärmeren und trockeneren Bestandesmikroklima führen, was wiederum die Wasserabgabe der Pflanzen beschleunigen könnte.

Wachstum und Ertrag von Kulturpflanzen

Im Rahmen der Klimafolgenabschätzung für die Landwirtschaft ist von Bedeutung, welche Wachstums- und Ertragsbeeinflussung bei Kulturpflanzen (Ackerbau, Grünland) durch eine zukünftig erhöhte CO₂-Konzentration über deren direkte Wirkungen auf die Photosynthese und indirekte Wirkungen auf den Wasserhaushalt zu erwarten sind. Hierzu liegt aus den letzten 30 Jahren eine hohe Zahl an Einzel-Informationen vor. Überwiegend stammen diese Ergebnisse aus Experimenten unter den angesprochenen, eher naturfernen Bedingungen (Klimakammern, Gewächshäuser etc.) und mit vergleichsweise hohen CO₂-Konzentrationen, während Versuchsansätze unter realen Feldbedingungen z.B. mit der FACE-Technik noch immer selten sind. Im Mittel über alle Versuchsdurchführungen zeigen die Ergebnisse aus den eher freilandfernen Experimenten, dass die Biomasse- bzw. Ertragszuwächse wichtiger Kulturpflanzen des C3-Typs (z.B. Weizen, Reis, Soja, Gerste, Raps) zwischen 15% und 30% liegen, wenn die CO₂-Konzentration in der Umgebungsluft der Pflanzen auf Werte zwischen 200 bis 300 ppm über dem jewei-

ligen Referenzwert der Umgebungsluft (ca. 350–380 ppm CO₂) angehoben wurde (AINSWORTH & MCGRATH 2010). Diese Ergebnisse streuen über sehr weite Bereiche, was sowohl an endogenen (z.B. Unterschiede in der Reaktion verschiedener Arten bzw. Sorten) als auch exogenen (Verfügbarkeit sonstiger Wachstumsressourcen wie Nährstoffe und Wasser, Temperaturbedingungen) Einflussfaktoren liegt. In den bisher relativ wenigen Feldversuchen mit der FACE-Technik fielen CO₂-Effekte auf Wachstum und Ertrag vergleichsweise meist geringer aus und betragen im Mittel ca. 15% bei einer CO₂-Anreicherung auf 550 ppm (LONG et al. 2006). Es bleibt umstritten, ob die eher freilandfernen Versuchsanstellungen die möglichen positiven Effekte zukünftiger CO₂-Konzentrationen überschätzen.

Eigene Untersuchungen in Fruchtfolgen aus Wintergerste, Zuckerrübe und Winterweizen sowie mit verschiedenen Maissorten in Norddeutschland (Braunschweig) mit der o.g. FACE-Technik (550 ppm CO₂) ergaben für die C3-Pflanzen Wachstums- bzw. Ertragszunahmen zwischen ca. 9–15% (Tab. 4.6-1; WEIGEL & MANDERSCHIED 2012; MANDERSCHIED et al. 2014). Die vielfach beobachtete relativ geringere Wachstumsstimulation durch mehr CO₂ bei eingeschränkter N-Versorgung konnte in diesem Versuch nicht eindeutig nachvollzogen werden. Erkennbar ist in Tab. 4.6-1

auch, dass die C4-Pflanze Mais entsprechend der theoretischen Erwartung nur unter eingeschränkter Wasserversorgung auf die erhöhte CO₂-Konzentration mit einer Wachstumsstimulation reagiert.

Die Ergebnisse zur Wirkung von mehr CO₂ auf Futterpflanzen bzw. Grünlandökosysteme sind heterogen, u.a. da unterschiedliche Grünlandtypen betrachtet wurden und die verschiedenen Bestandbildner (Kräuter, Gräser, Leguminosen) unterschiedlich auf CO₂ reagieren. Untersuchungen an typischen Vertretern von Futterpflanzen (z.B. Weidelgras; Klee) ergaben ähnlich hohe Ertragszuwächse wie bei den o.g. Ackerkulturen, wobei insbesondere Kleearten aufgrund der Symbiose mit N₂-Fixierern von einer CO₂-Anreicherung profitieren.

Qualität pflanzlicher Produkte

Eine in fast allen Studien zum »CO₂-Dünge-Effekt« beobachtete Reaktion ist die Veränderung der chemischen Zusammensetzung des pflanzlichen Gewebes. Betroffen sind sowohl der Gehalt an Makro- (z.B. Stickstoff (N), Schwefel (S), Phosphor (P), Kalium (K)) und Mikroelementen (z.B. Eisen (Fe), Zink (Zn), Mangan (Mn), Magnesium (Mg)) (MCGRATH & LOBELL 2013b) als auch die Konzentrationen sonstiger Inhaltsstoffe (z.B. Zucker, Vitamine, sekundäre Pflanzenstof-

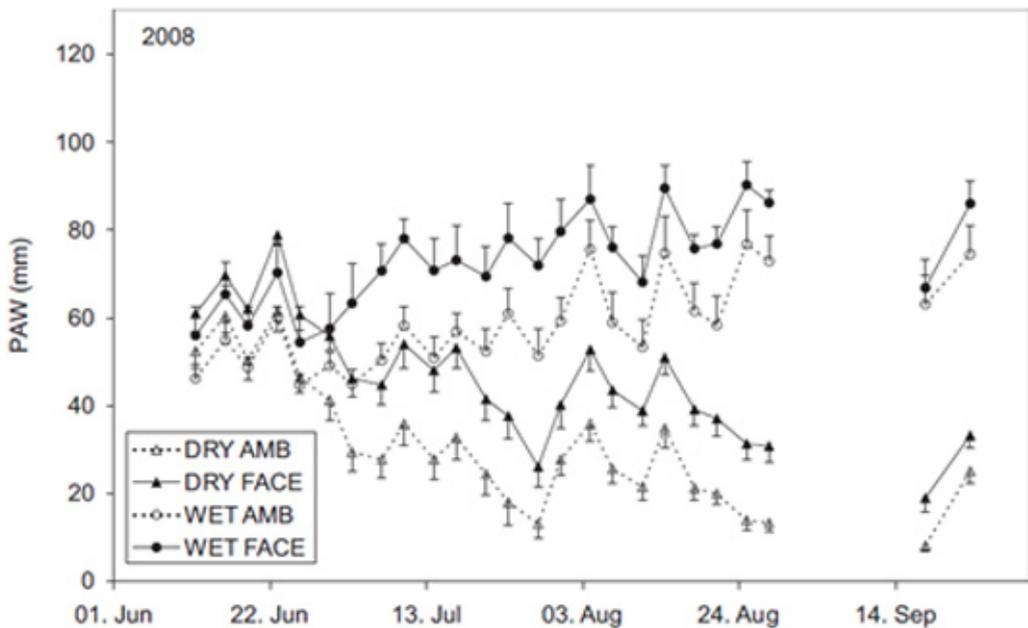


Abb. 4.6-2: Verlauf des pflanzenverfügbaren Bodenwassers (PAW = plant available water content = Wassermenge, die von den Pflanzen durch die Wurzel aufgenommen werden kann) eines Maisbestandes (Sorte »Romario«) aus einem FACE-Versuch in Braunschweig unter normaler (offene Symbole; 385 ppm) und unter erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentration (gefüllte Symbole; 550 ppm) sowie ausreichender (oberes Linienpaar/Kreise) bzw. reduzierter (unteres Linienpaar/Dreiecke = Wasserstress) Wasserversorgung; verändert aus MANDERSCHIED et al. (2014).

fe). Herausragendes Beispiel dafür ist die Reduktion des N-Gehaltes sowohl in vegetativen Organen (Blatt, Stängel) als auch in Früchten, Samen bzw. Körnern. CO₂-Anreicherungsversuche (550–650 ppm) z.B. mit Baumwolle, Weidelgras, Klee, Weizen und Gerste unter unterschiedlichen Wachstumsbedingungen ergaben im Mittel über alle Versuchsbedingungen eine Reduktion des N-Gehaltes im Blatt oder in den Getreidekörnern in der Größenordnung zwischen 10–15% im Vergleich zur heutigen CO₂-Konzentration (KIMBALL 2004; WEIGEL & MANDERSCHIED 2005; TAUB et al. 2008).

Insbesondere im Getreidekorn ist die CO₂-bedingte Reduktion der N-Konzentration gleichbedeutend mit einem signifikanten Proteinverlust (HÖGY & FANGMEIER 2008). Verschiedene CO₂-Anreicherungsversuche (ca. 550–700 ppm) mit Winter- und Sommerweizen konnten zeigen, dass nicht nur der Rohproteingehalt im Korn um ca. 10–15% abnimmt, sondern dass sich auch die relativen Anteile einzelner Proteinfaktionen (z.B. strukturell-metabolische Proteine vs. Speicherproteine bzw. Klebereiweiße) verschieben (HÖGY et al. 2009; WIESER et al. 2008). Erstmals konnten CO₂-bedingte Veränderungen in der Proteinzusammensetzung von Weizenkörnern quantitativ durch moderne Analysemethoden wie zweidimensionale Gel-Elektrophorese (2D-GE), die eine hochauflösende Trennung von mehreren hundert individuellen Proteinen in einem Analysengang erlaubt, bestätigt werden (HÖGY et al. 2009). Insgesamt sind diese Änderungen wertgebender Elemente bzw. Inhaltsstoffe von Nahrungs- (und Futter)pflanzen als eine Konsequenz der CO₂-Anreicherung in der Atmosphäre mit Sorge zu betrachten, da sich dadurch die globale Ernährungssituation und insbesondere das Problem des »verdeckten Hungers« (»hidden hunger«), d.h. der Unterversorgung mit Mikronährstoffen, in einigen Regionen der Erde in Zukunft verstärken könnte (LOLADZE 2002).

Tab. 4.6-1: Relative Änderungen von Ertragsparametern verschiedener Kulturpflanzen unter einer erhöhten CO₂-Konzentration von 550 ppm im Vergleich zum Ertrag bei heutiger CO₂-Konzentration (385 ppm). Die Pflanzen wurden in Feldversuchen mit der FACE-Technik im Rahmen einer 6-jährigen Fruchtfolge (1-4; vgl. WEIGEL & MANDERSCHIED 2012) bzw. eines 2-jährigen Maisanbaus (5; vgl. MANDERSCHIED et al. 2014) kultiviert. Dabei wurden die Wechselwirkungen von CO₂ mit der N- (Nvoll = optimal, ortsübliche Praxis; Nhalb=50% voll) und Wasserversorgung (feucht = optimale Bewässerung; trocken = Bestände erhielten die Hälfte der Wassermenge der feuchten Variante) untersucht.

| | Frucht | Parameter | Kovariable | CO₂-Effekt (%) |
|---|---------------|---------------------------|-------------------|----------------------------------|
| 1 | Gerste | Kornertrag | Nvoll | + 12,0 |
| | | | Nhalb | + 14,8 |
| 2 | Weidelgras | Oberirdische Trockenmasse | Nvoll | + 8,8 |
| | | | Nhalb | + 9,8 |
| 3 | Zuckerrübe | Zuckerertrag | Nvoll | + 10,3 |
| | | | Nhalb | + 14,2 |
| 4 | Weizen | Kornertrag | Nvoll | + 15,6 |
| | | | Nhalb | + 11,7 |
| 5 | Mais | Oberirdische Biomasse | Nass | 0 |
| | | | Feucht | + 24 |

Interaktionen und indirekte Effekte im Agrarökosystem

Die zukünftige Klimaentwicklung ist durch Veränderungen von CO₂-Konzentration, Niederschlagsverhältnissen und Temperaturen gekennzeichnet. Offen ist z.Z., wie diese Parameter in ihrer Wirkung auf die Kulturpflanze bzw. das Agrarökosystem interagieren und wie andere Stressfaktoren die Wirkung des CO₂ beeinflussen.

Modelle und Experimente zeigen z.B., dass die positive Wirkung von erhöhten CO₂-Konzentrationen auf die Photosynthese von Kulturpflanzen mit steigender Temperatur zunimmt. Diese Art der Wechselwirkung zeigt sich jedoch nicht immer auf der Ebene des Pflanzenwachstums. Es wurden sowohl positive, keine als auch negative Interaktionen festgestellt, d.h. im letzteren Fall bewirkte die CO₂-Anreicherung unter erhöhten Temperaturen einen Wachstumsabfall im Vergleich zur Behandlung mit der heutigen CO₂-Konzentration. Auf die Rückkoppelungen der Wirkung einer erhöhten CO₂-Konzentration auf die Wassernutzungseffizienz und die Bestandestemperaturen wurde schon hingewiesen (s.o). Durch die antitranspiratorische Wirkung des CO₂ könnte ein zukünftiger Rückgang der Sommerniederschläge teilweise kompensiert werden, während die mit dieser CO₂-Wirkung verbundene Erwärmung der Pflanzenbestände die Wirkung einer klimatischen Temperaturerhöhung weiter verstärken würde. Wird also bei einem Temperaturanstieg zunehmend auch die Wasserversorgung zum limitierenden Faktor in Pflanzenbeständen, könnte der »CO₂-Dünge-Effekt« eine entscheidende Rolle für das Ergebnis der Wechselwirkungen spielen.

In vielen Pflanzenwachstums- bzw. Ertragsmodellen fallen negative Ertragseffekte bei Getreide, die allein aufgrund erhöhter Temperaturen (und schlech-

terer Wasserversorgung) berechnet werden, wesentlich geringer aus bzw. kehren sich in positive Wirkungen um, wenn der CO₂-Dünge-Effekt in die Bewertung mit einbezogen wird. Dies wiederum hängt davon ab, wie hoch die CO₂-bedingten Ertragszunahmen angesetzt werden. Auch für die Bewertung der Folgen einer zunehmenden Klimavariabilität bzw. der Zunahme von Extremereignissen muss berücksichtigt werden, dass diese Szenarien in einer Atmosphäre wirksam werden, in der allen Pflanzen grundsätzlich mehr CO₂ zur Verfügung steht. Es konnte z.B. gezeigt werden, dass der Photosyntheseapparat von Pflanzen unter erhöhtem CO₂-Angebot weniger stark durch Hitzestress beeinträchtigt wird.

Bodennahes Ozon (O₃) beeinträchtigt in vielen Teilen der Erde nach wie vor Wachstum und Qualität von Kulturpflanzen (FUHRER & BOOKER 2003; BENDER & WEIGEL 2011). Es kann spekuliert werden, dass positive CO₂-Wirkungen in Anwesenheit phytotoxischer O₃-Konzentrationen abgeschwächt werden, bzw. dass in Regionen mit zukünftig hohen O₃-Belastungen während der Vegetationsperiode der positive Effekt einer CO₂-Erhöhung eventuell nicht voll wirksam werden kann.

Pflanzenkrankheiten gehören zu den weiteren Risiken in der Agrarproduktion. Das Ausmaß ihres Auftretens wird von Witterungseinflüssen, von Wachstum sowie Überdauerungs- und Ausbreitungsvermögen der Schaderreger und von der Anfälligkeit bzw. den Eigenschaften der Wirtspflanze bestimmt (CHAKRABORTY & PANGGA 2003). Änderungen in der chemischen Zusammensetzung von Wirtspflanzen (Reduktion der N-Gehalte im Blatt, Zunahme löslicher Kohlenhydrate) durch mehr CO₂ in der Atmosphäre bewirken qualitative Veränderungen der Nahrungsquelle für Herbivore bzw. sonstige Schaderreger (MANNING & TIEDEMANN 1995).

Die unterschiedliche Reaktion von C3- und C4-Pflanzen auf erhöhte CO₂-Konzentrationen könnte darüber hinaus auch zu veränderten Konkurrenzverhältnissen zwischen Nutzpflanzen und Unkräutern führen. Da einige Unkräuter dem C4-Typ angehören und somit im Vergleich zu den C3-Nutzpflanzen nicht oder nur eingeschränkt auf erhöhte CO₂-Konzentrationen (und zunehmenden Wassermangel) reagieren, sind Veränderungen dieser Konkurrenzbeziehungen (d.h. hier positive Wirkungen) denkbar. Andererseits würden C3-Unkräuter z.B. in C4-Beständen (Mais) von der CO₂-Düngung relativ mehr profitieren, d.h. auch hier wären negative Effekte denkbar.

Schlussbetrachtung

Der weitere rasche Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre gehört zu den deutlichsten Signalen des

Klimawandels und ist unzweifelhaft. Mehr CO₂ wirkt sich als »CO₂-Dünge-Effekt« prinzipiell positiv auf die Biomasse- und Ertragsproduktion landwirtschaftlicher Kulturarten des C3-Typs aus. C4-Pflanzen wie Mais profitieren vom CO₂-Anstieg vor allem unter Trockenheit. Damit wirkt der CO₂-Anstieg negativen Effekten zunehmender Temperaturen und abnehmender Wasserverfügbarkeit prinzipiell entgegen. Ob bzw. inwieweit dies in Zukunft eintreten könnte, ist derzeit schwer abschätzbar, da Wechselwirkungen der Veränderungen der verschiedenen Klimaparameter untereinander sowie direkte und indirekte Rückkoppelungseffekte mit anderen Wachstums- und mit Managementfaktoren kaum untersucht sind. Auch CO₂-bedingte Veränderungen in der pflanzlichen Qualität sowie die daraus resultierenden ökonomischen und ökologischen Folgen sowie die Entwicklung geeigneter Anpassungsmaßnahmen sind erst in Ansätzen bekannt. Im Rahmen der Klimawirkungsforschung sind weitere Feldversuche zur Interaktion verschiedener Klimaparameter (z.B. FACE-, Erwärmungs- und Wasserstressexperimente) erforderlich, insbesondere, um die Vielzahl der derzeit existierenden Aussagen von Klima-Impakt-Modellen zu validieren. Hierbei sind auch die absehbaren Fortschritte im landwirtschaftlichen Management und besonders in der Pflanzenzüchtung mit zu berücksichtigen.

Literatur

- AINSWORTH E. A. & J. M. MCGRATH (2010): Direct effects of rising atmospheric carbon dioxide and ozone on crop yields. In: LOBELL, D. & M. BURKE (eds). Climate change and food security. Adapating agriculture to a warmer world. Advances in Global Change Research 37, Springer, 109-130.
- BENDER J & H. J. WEIGEL (2011): Changes in atmospheric chemistry and crop health: a review. *Agronomy Sustainable Dev* 31(1), 81-89.
- CHAKRABORTY S. M. & I. B. PANGGA (2003): Plant diseases and climate change. In: HOLMES A. & M. GILLINGS (eds): *Plant Microbiology*. Bios Scientific Publishers, Oxford, UK.
- FUHRER J. & F. BOOKER (2003): Ecological issues of ozone: agricultural issues. *Environ. Int.* 29, 141-154.
- 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.
- HÖGY P. & A. FANGMEIER (2008): Effects of elevated atmospheric CO₂ on grain quality of wheat. *J Cereal Sci.* 48, 580-591.
- HÖGY P., WIESER H., KÖHLER P., SCHWANDORF K., BREUER J., FRANZARING J., MUNTEFERING R. & A. FANGMEIER (2009): Effects of elevated CO₂ on grain yield and quality of wheat: results from a 3-year free-air CO₂ enrichment experiment. *Plant Biol.* 11, 60-69.
- HÖGY P., ZÖRB C., LANGENKÄMPER G., BETSCHE T. & A. FANGMEIER (2009): Atmospheric CO₂ enrichment changes the wheat grain proteome. *J Cereal Sci.* 50, 248-254.
- KIMBALL B. A. (2004): *Global Environmental Change: Im-*

- lications for Agricultural Productivity. *Crop, Environment and Bioinformatics* 1, 251-263.
- LOLADZE I. (2002): Rising atmospheric CO₂ and human nutrition: towards globally imbalanced plant stoichiometry? *TREE* 17, 457-461.
- LONG S. P., AINSWORTH E A, A. D. B. LEAKEY, J. NÖSBERGER D. & R. ORT (2006): Food for thought: Lower-than expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science* 312, 1918-1921.
- MANDERSCHIED R., ERBS, M. & H. J. WEIGEL (2014): Interactive effects of free-air CO₂ enrichment and drought stress on maize growth. *Europ. J. Agronomy* 52, 11–21.
- MANNING W. J. & A. V. VON TIEDEMANN (1995): Climate change: potential effects of increased atmospheric carbon dioxide (CO₂), ozone (O₃), and ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases. *Environ. Pollut.* 88, 219-245.
- MCGRATH J. M. & D. B. LOBELL (2013a): Regional disparities in the CO₂ fertilization effect and implications for crop yield. *Environ.Res.Lett.* 8, 014054 (9 pp)
- MCGRATH J. M. & D. B. LOBELL (2013b): Reduction of transpiration and altered nutrient allocation contribute to nutrient decline of crops grown in elevated CO₂ concentrations. *Plant, Cell Environ.* 36, 697–705.
- TAUB D. R., MILLER B. & H. ALLEN (2008): Effects of elevated CO₂ on the protein concentration of food crops: a meta-analysis. *Glob Change Biol.* 14, 565–575.
- TAUB D.R. & X. WANG (2008): Why are nitrogen concentrations in plant tissues lower under elevated CO₂? A critical examination of the hypotheses. *J Integrated Plant Biol.* 50, 1365-1374.
- WEIGEL H. J. & R. MANDERSCHIED (2005): CO₂ enrichment effects on forage and grain nitrogen content of pasture and cereal plants. *J. Crop Improv.* 13, 73-89.
- WEIGEL H. J. & R. MANDERSCHIED (2012): Crop growth responses to free air CO₂ enrichment and nitrogen fertilization: Rotating barley, ryegrass, sugar beet and wheat. *Eur. J. Agron.* 43, 97-107.
- WIESER H., MANDERSCHIED, R., ERBS, M. & H. J. WEIGEL (2008): Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on the quantitative protein composition of wheat grain. *J. Agric. Food Chem.* 56, 6531-6535.

Kontakt:

Prof. Dr. Hans Joachim Weigel
Dr. Remy Manderschied
Thünen-Institut für Biodiversität
hans.weigel@ti.bund.de
remy.manderschied@ti.bund.de
Prof. Dr. Andreas Fangmeier
PD Dr. Petra Högy
Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie
Universität Hohenheim, Ökologiezentrum
andreas.fangmeier@uni-hohenheim.de
petra.hoegy@uni-hohenheim.de

Weigel, H.-J., R. Manderschied, A. Fangmeier & P. Högy (2014): Mehr Kohlendioxid in der Atmosphäre: Wie reagieren Kulturpflanzen? In: Lozán, J. L., Grassl, H., Karbe, L. & G. Jendritzky (Hrsg.). Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. 2. Auflage. Elektron. Veröffent. (Kap. 4.6) - www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de.