

Thünen à la carte

FACE-Versuche: Basis für Klimafolgenmodelle

Hans-Joachim Weigel,
Remy Manderscheid
Januar 2016



FACE-Versuche: Basis für Klimafolgenmodelle

Hans-Joachim Weigel, Remy Manderscheid

Markanteste Ursache des Klimawandels ist der rasche Anstieg der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre. CO_2 ist nicht nur „Treibhausgas“, sondern als Substrat der Photosynthese von fundamentaler Bedeutung für alle Pflanzen. Ein gegenüber der heutigen Situation höheres CO_2 -Angebot steigert bei fast allen Pflanzen die Photosynthese. Wird sich dieser Effekt vor dem Hintergrund des allgemeinen Klimawandels positiv auf Wachstum und Erträge unserer Kulturpflanzen auswirken? In außergewöhnlichen Feldexperimenten tragen wir dazu bei, diese Frage zu beantworten.

Die CO_2 -Konzentration der Atmosphäre steigt global rasch an und hat bereits 400 parts per million (ppm) erreicht. Zukunftsszenarien erwarten, dass die CO_2 -Konzentration in 50 Jahren bei 470 bis 600 ppm bzw. bis zum Ende des 21. Jahrhunderts bei mehr als 900 ppm liegen wird. Die Klimafolgenabschätzung für die Landwirtschaft versucht mithilfe verschiedener Pflanzenwachstums- oder Agroökosystemmodelle neben dem Einfluss der Veränderungen von Temperatur und Niederschlag auch die Auswirkung des CO_2 -Anstiegs sowie die Interaktion dieser verschiedenen Faktoren abzubilden. Dabei wird immer wieder deutlich, dass Richtung und Ausmaß der Aussagen dieser Modelle entscheidend dadurch geprägt werden, ob und in welcher Höhe der „ CO_2 -Dünge-Effekt“ berücksichtigt wird (Hertel 2015; Abbildung 1). Eine möglichst genaue Kenntnis darüber, wie sich dieser Effekt im Feld auswirkt, ist daher von besonderer Bedeutung.

WIE REAGIEREN PFLANZEN AUF MEHR CO_2 IN DER ATMOSPÄRE?

Bei C_3 -Pflanzen wie Weizen, Reis, Zuckerrübe und Soja wird CO_2 im Blattinnern von dem Enzym RuBisCO an ein Molekül mit drei C-Atomen gebunden. Das Enzym ist bei der gegenwärtigen CO_2 -Konzentration nicht gesättigt, das heißt mehr CO_2 fördert die CO_2 -Assimilation bei diesen Pflanzen. Auf eine CO_2 -Anreicherung von ca. 550 bis 750 ppm können sie mit einer Steigerung der Photosynthese-Rate um bis zu 50% reagieren. Pflanzen des C_4 -Typs wie Mais, Hirse und Zuckerrohr mit einem anderen CO_2 -Fixierungsmechanismus reagieren nicht mit einer Photosynthese-Steigerung auf mehr CO_2 . Beide Pflanzentypen verengen unter einer CO_2 -Erhöhung allerdings ihre Spaltöffnungen und damit die Abgabe von Wasserdampf an die Atmosphäre (Blatttranspiration).

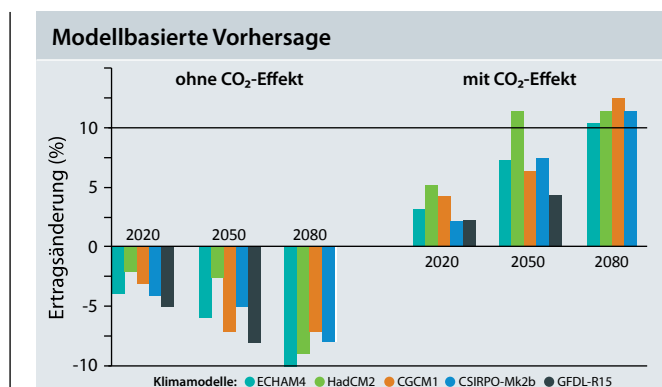


Abbildung 1: Modellbasierte Vorhersage (Modelle: DSSAT-CERES) von Winterweizen-erträgen in Nordostösterreich unter zukünftigen Klimaszenarien ohne und mit Berücksichtigung des „ CO_2 -Dünge-Effektes“ (verändert nach Alexandrov *et al.* 2002)

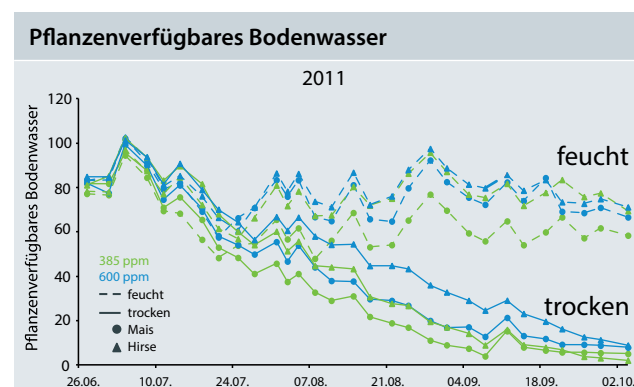


Abbildung 2: Pflanzenverfügbares Bodenwasser (mm) in 0 bis 60 cm Tiefe unter Mais (Sorte Simao) und Sorghum-Hirse (Sorte Bulldozer) in Braunschweiger FACE-Versuchen bei ausreichender (feucht) und reduzierter Wasserversorgung (trocken)



Foto 1: Freiland- CO_2 -Anreicherungsringe (FACE-System) in einem Winterweizenbestand im Juli in Braunschweig. Innerhalb der von vertikalen Ausströmröhrn begrenzten Ringfläche (hellgrün) kann die CO_2 -Konzentration dauerhaft erhöht werden.

Dadurch kann sich eine Wasserersparnis ergeben. Bei C_3 -Pflanzen verändert sich darüber hinaus durch mehr CO_2 die chemische Zusammensetzung bzw. die Qualität des pflanzlichen Gewebes. Für die Klimafolgenabschätzung ist von besonderer Bedeutung, wie sich diese Primäreffekte des CO_2 auf Erträge und Qualität der Feldfrüchte auswirken werden. Mit diesen Fragen befassen wir uns in sogenannten FACE-Versuchen.

FACE: METHODE DER WAHL ZUR UNTERSUCHUNG DES „ CO_2 -DÜNGE-EFFEKTES“

Mit der FACE-Technik (Free Air Carbon Dioxide Enrichment) lassen sich künftige atmosphärische CO_2 -Bedingungen direkt im Feld simulieren – ohne jedweden Einschluss der Bestände in Folien oder Glas. Diese Methode setzen wir in Braunschweig seit mehr als zehn Jahren ein. Das ringförmige FACE-System (Foto 1) erlaubt es, eine erhöhte CO_2 -Zielkonzentration (z.B. 550 ppm) dauerhaft innerhalb der Ringfläche einzustellen. Um erstmals im Feld die Wechselwirkung zwischen mehr CO_2 und Trockenheit gezielt zu untersuchen, wurde zudem ein Regenausschluss-System zur FACE-Methode entwickelt (Manderscheid *et al.* 2014; Foto 2). FACE-Experimente gelten zurzeit als optimaler Versuchsansatz, um künftige CO_2 -Szenarien für Pflanzen realitätsnah zu simulieren. Weder beeinflussen sie das Mikroklima der Pflanzenbestände noch deren natürliche Wachstumsbedingungen. FACE-Experimente sind technisch aufwendig, wegen des CO_2 -Verbrauchs kostenintensiv und daher selten.

MEHR CO_2 HILFT PFLANZEN WASSER ZU SPAREN UND STEIGERT DIE ERTRÄGE

In FACE-Versuchen mit Fruchtfolgen aus Gerste, Zuckerrübe und Weizen (C_3 -Pflanzen) und in Versuchen mit verschiedenen Mais- und Hirsegenotypen (C_4 -Pflanzen) konnten wir zeigen, dass infolge

ge einer verminderten Blatttranspiration auch die Wasserabgabe (Transpiration) der Pflanzenbestände abnimmt. Unter den Beständen aller dieser Feldfrüchte wurde gleichzeitig eine erhöhte Bodenfeuchte festgestellt (Abbildung 2). Derartige Ergebnisse legen nahe, dass diese „Wasserersparnis“ durch mehr CO_2 künftig zunehmende Trockenheitsphasen im Zuge des Klimawandels abmildert.

In einer Vielzahl von eher „freilandfernen“ Experimenten in den vergangenen 30 Jahren wurden positive Wachstumseffekte auf Kulturpflanzen durch mehr CO_2 festgestellt. Diese reichten bis zu 30%, wenn die CO_2 -Konzentration zwischen 200 und 300 ppm über dem jeweiligen Referenzwert der Umgebungsluft (350 bis 380 ppm CO_2) lag. Die diesbezüglichen Einzelergebnisse streuen allerdings über sehr weite Bereiche. In den vergleichsweise wenigen Feldversuchen mit der FACE-Technik – in den USA, Japan, China und Australien – fielen positive CO_2 -Effekte meist geringer aus und betrugen im Mittel nur ca. 15%, wenn die CO_2 -Konzentration auf 550 ppm erhöht wurde (Long *et al.* 2006).

In den europaweit einzigen FACE-Untersuchungen in Fruchtfolgen des Ackerbaus mit einer CO_2 -Konzentration von 550 ppm in Braunschweig haben wir ähnlich hohe Wachstums- bzw. Ertragszunahmen – zwischen 9 und 15% – ermittelt (Tabelle 1, Seite 5; Weigel und Manderscheid 2012). Häufig wird beschrieben, dass eine CO_2 -Stimulation des Wachstums bei eingeschränkter Versorgung mit Nährstoffen – und hier insbesondere Stickstoff – geringer ausfällt als bei ausreichender Nährstoffverfügbarkeit. In den Braunschweiger FACE-Versuchen konnte dies nicht eindeutig nachvollzogen werden (Tabelle 1). Erstmals wurde in Braunschweig in einem FACE-Versuch unter realen Feldbedingungen gezeigt, dass bei Mais ein „ CO_2 -Dünge-Effekt“ nur zu beobachten ist, wenn die Pflanzen unter Wassermangel leiden und ein entsprechend vermindertes Wachstum zeigen (Tabelle 2, Seite 5; Manderscheid *et al.* 2014).

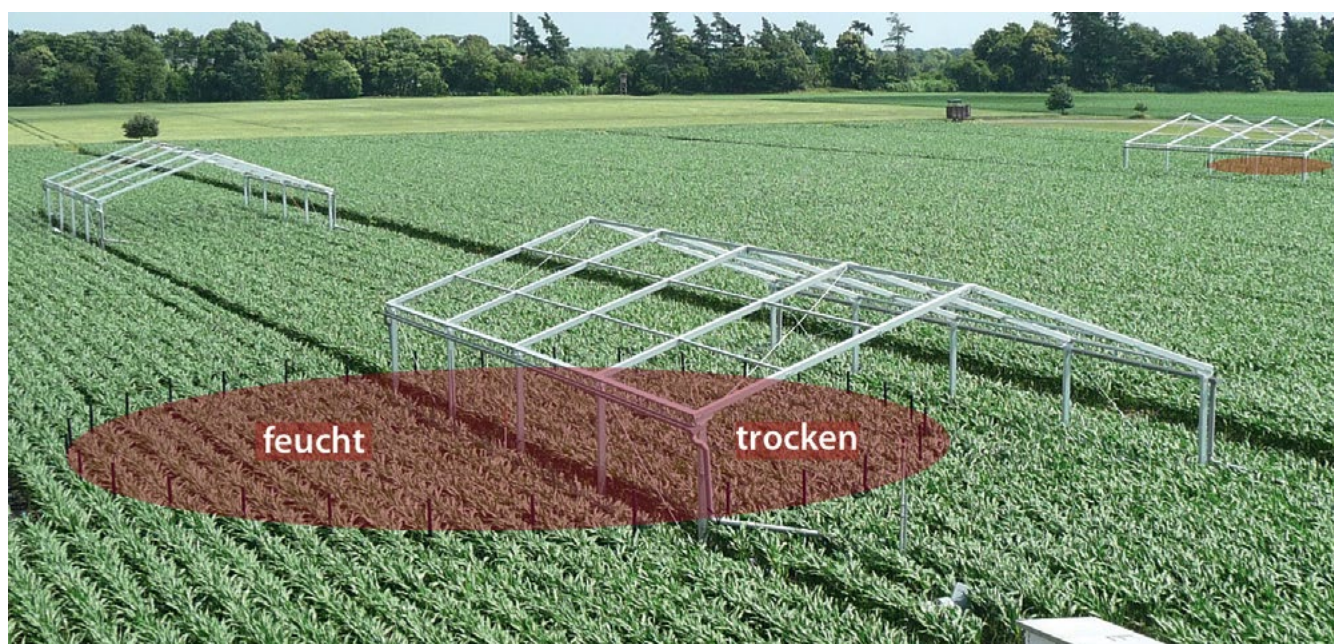


Foto 2: Freiland-CO₂-Anreicherungsring (FACE-System) in Braunschweig kombiniert mit einem Regenausschluss-System („rain-out shelter“) zur gleichzeitigen Simulation von Trockenheitseffekten. Die rot-braune Kreisfläche wird mit CO₂ angereichert.

Abschätzungen über die Höhe des „CO₂-Dünge-Effektes“ unter Feldbedingungen bleiben schwierig, da nach wie vor nur wenige FACE-Versuche mit nur relativ wenigen Kulturpflanzenarten vorliegen und kaum Informationen über die Wechselwirkungen des CO₂ mit anderen Wachstumsfaktoren (Temperatur, Wasser- und Nährstoffversorgung) existieren. Auch über mögliche Unterschiede in der CO₂-Reaktion zwischen verschiedenen Genotypen einer Art ist fast nichts bekannt. Kontrovers diskutiert wird insbesondere, welche Versuchsanstellungen – Freiland oder Labor – geeignete Ergebnisse liefern, die für die Klimafolgenabschätzung in entsprechenden Modellen eingesetzt werden können. Klimakammerversuche z.B. stehen in der Kritik, die möglichen positiven Effekte des CO₂-Anstiegs im Vergleich zu FACE-Ergebnissen zu überschätzen und damit negative Wirkungen des Klimawandels zu stark zu relativieren. Dies gilt auch für die Bewertung der Folgen einer zunehmenden Klimavariabilität bzw. einer Zunahme von Extremereignissen.

CO₂-ANREICHERUNG VERÄNDERT PFLANZEN-QUALITÄT

In fast allen Studien zum „CO₂-Dünge-Effekt“ verändern sich die Konzentrationsverhältnisse an Makro- und Mikroelementen (z.B. Stickstoff, Schwefel, Eisen, Zink) sowie sonstiger Inhaltsstoffe (z.B. Zucker, Vitamine, sekundäre Pflanzenstoffe) im pflanzlichen Gewebe. Im Getreidekorn z.B. ist die CO₂-bedingte Stickstoff-Reduktion gleichbedeutend mit einem signifikanten Proteinverlust. In den FACE-Versuchen in Braunschweig konnten wir zeigen, dass bei Winterweizen nicht nur der Rohproteingehalt im Korn um ca. 10 bis 15 % abnimmt, sondern dass sich auch die relativen Anteile einzelner Proteinfractionen verschieben (z.B. strukturell-metabolische Proteine vs. Speicherproteine bzw. Klebereiweiße) – mit möglichen Konsequenzen z.B. für die Backqualität (Wieser *et al.* 2008). Änderungen wertgebender Inhaltsstoffe (z.B. Proteine,

Makro- bzw. Mikronährstoffe) durch eine erhöhte CO₂-Konzentration in der Atmosphäre sind hinsichtlich des sogenannten versteckten Hungers (hidden hunger) von Bedeutung (Myers *et al.* 2014). Ist einseitige Ernährung verbunden mit fehlender Versorgung an Vitaminen, Mineralstoffen, Spurenelementen, essenziellen Fettsäuren und Eiweißen, tritt trotz ausreichender Energieversorgung eine Mangelerkrankung auf. Das Phänomen des „versteckten Hungers“ ist vor allem in den Entwicklungsländern verbreitet.

FACE-DATEN FÜR MODELLE

Verschiedene Arbeitsgruppen im In- und Ausland setzen die Datensätze der Braunschweiger FACE-Versuche ein, um Modelle zur Klimafolgenabschätzung für künftige Kulturpflanzenerträge weiterzuentwickeln und neu zu kalibrieren. Dies geschieht z.B. im Rahmen von Ertragsabschätzungen durch den Klimawandel für Deutschland (Kersebaum and Nendel 2014) und des globalen Agricultural Model Intercomparison Projects (AgMIP). Jüngst in Braunschweig durchgeführte FACE-Versuche, die mit Vorrichtungen zur Erwärmung von Pflanzenbeständen gekoppelt sind, widmen sich der Interaktion zwischen Hitzestress- und CO₂-Effekten bei Getreide. Diese Versuche dienen nicht nur dazu, die Prozesse der Wechselwirkung dieser beiden Komponenten des Klimawandels besser zu verstehen, sondern reagieren speziell auf die Anforderungen seitens der Klimafolgenmodellierung.

BEDEUTUNG DER ERGEBNISSE FÜR DIE PFLANZENZÜCHTUNG

FACE-Versuche und Feldversuche mit Kammern in Braunschweig haben unter anderem gezeigt, dass einige unserer heutigen Kulturpflanzenarten den grundsätzlich positiven Wachstumseffekt

Kultur	Stickstoff-düngung	Parameter	CO ₂ -Effekt (%)
Gerste	100	Kornertrag	+ 12,0
	50		+ 13,1
Weidelgras	100	Oberirdische Biomasse	+ 8,8
	50		+ 9,8
Zuckerrübe	100	Zuckerertrag	+ 10,3
	50		+ 14,2
Weizen	100	Kornertrag	+ 15,6
	50		+ 11,7

Tabelle 1: Auswirkungen einer erhöhten CO₂-Konzentration (550 ppm) auf Ertragsparameter verschiedener Kulturpflanzen in einer Fruchtfolge in Abhängigkeit von der Stickstoff-Versorgung ermittelt in FACE-Versuchen in Braunschweig (100 = ortsübliche Volldüngung; 50 = um 50 % reduzierte Volldüngung). Angegeben ist die prozentuale Abweichung von der Umgebungsluft mit heutiger CO₂-Konzentration.

	1. Versuchsjahr		2. Versuchsjahr		Trockenstress-Effekt (2. Jahr)
	feucht	trocken	feucht	trocken	
385 ppm	10,4	10,0	11,3	7,3	- 39,5 %
550 ppm	10,3	10,2	11,2	10,2	- 14,5 %
CO ₂ -Effekt	-1 %	1 %	-1 %	41 %	

Tabelle 2: Auswirkungen einer erhöhten CO₂-Konzentration auf den Kornertrag (t/ha) von Mais in FACE-Versuchen in Braunschweig unter ausreichender (feucht) und reduzierter (trocken) Wasserversorgung sowie relative CO₂- und Trockenheitseffekte. Im ersten Versuchsjahr konnte kein wirksamer Trockenheitseffekt induziert werden.

der erhöhten CO₂-Konzentration nicht optimal für mehr Wachstum ausnutzen können und dass verschiedene Sorten einer Art deutlich unterschiedliche Reaktionen auf mehr CO₂ zeigen. Hieraus lässt sich die Frage ableiten, ob bzw. inwieweit Möglichkeiten bestehen, den „CO₂-Dünge-Effekt“ züchterisch gezielt zu optimieren, um von einem zukünftig hohen „CO₂-Angebot“ aus der Atmosphäre maximalen Nutzen ziehen zu können. Dazu sind sogenannte Screening-Untersuchungen geplant, in denen unter Verwendung der FACE-Technik eine möglichst hohe Zahl unterschiedlicher Genotypen, z.B. von Weizen oder Gerste, auf ihre Reaktionen gegenüber mehr CO₂ getestet werden.

WEITERFÜHRENDE LITERATUR

Alexandrov, V., Eitzinger, J., Cajic, V., and M. Oberforster: Potential impact of climate change on selected agricultural crops in north-eastern Austria. *Global Change Biology* 8 (2002), S. 372-389

Hertel T.W.: The challenge of sustainably feeding a growing planet. *Food Security* 7 (2015), S. 185-198

Kersebaum, K. and C. Nendel: Site-specific impacts of climate change on wheat production across regions of Germany using different

CO₂-response functions. *European Journal of Agronomy* 52 (2014), S. 22-32

Long, S. P., E.A. Ainsworth, A.D.B. Leakey, J. Nösberger and D.R. Ort: Food for thought: Lower-than expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science* 312 (2006), S. 1918-1921

Manderscheid, R., M. Erbs and H.J. Weigel: Interactive effects of free-air CO₂ enrichment and drought stress on maize growth. *European Journal of Agronomy* 52 (2014), S. 11-21

Myers, S.S., A. Zanobetti, I. Kloog, P. Huybers, A.D. Leakey, A.J. Bloom *et al.*: Increasing CO₂ threatens human nutrition. *Nature* 510 (2014), S. 139-142

Weigel, H.J. and R. Manderscheid: Crop growth responses to free air CO₂ enrichment and nitrogen fertilization: Rotating barley, ryegrass, sugar beet and wheat. *European Journal of Agronomy* 43 (2012), S. 97-107

Wieser, H., R. Manderscheid, M. Erbs and H.J. Weigel: Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on the quantitative protein composition of wheat grain. *Journal of Agricultural Food Chemistry* 56 (2008), S. 6531-6535

Zitationsvorschlag – *Suggested citation*:

Weigel H-J, Manderscheid R (2016)

FACE-Versuche: Basis für Klimafolgen-
modelle. Braunschweig: Johann

Heinrich von Thünen-Institut, 6 p,

Thünen à la carte 4,

DOI:10.3220/CA1448954386000



THÜNEN

Thünen à la carte 4

Januar 2016

Herausgeber/Redaktionsanschrift

Thünen-Institut

Bundesallee 50

38116 Braunschweig

Germany

thuenenalacarte@ti.bund.de

www.ti.bund.de

ISSN 2363-8052

DOI:10.3220/CA1448954386000

Fotos: Thünen-Institut