

Einfluss erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen auf die globale Vegetationsentwicklung sowie den Ertrag und die Produktqualität im landwirtschaftlichen Pflanzenbau

Influence of elevated atmospheric CO₂ concentrations on global vegetation development and on yields as well as on product quality of agricultural plants

Wolfgang Merbach^{1*}, Helfried Zschaler², Dietrich Schulzke³

¹ Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Julius-Kühn-Straße 25, 06112 Halle (Saale), Deutschland

² Institut für Folgenabschätzung im Pflanzenschutz, Stahnsdorfer Damm 81, 14532 Kleinmachnow, Deutschland

³ Landesanstalt für Großschutzgebiete, Am Stadtsee, 16225 Eberswalde, Deutschland

* Korrespondierender Autor: merbach@landw.uni-halle.de

Einreichung: 20. November 2020, überarbeitete Einreichung: 7. Februar 2021, Annahme: 8. Februar 2021

Zusammenfassung

Die Beziehungen zwischen erhöhtem CO₂-Angebot einerseits und Vegetationsentwicklung, Pflanzenwachstum, Ertrag und Qualität verschiedener Fruchtarten andererseits wurden exemplarisch anhand der weltweit vorliegenden Beobachtungen und Experimente (Metastudien) untersucht, wobei die FACE-Methodik (Free-air-CO₂-Enrichment-Methode) besondere Beachtung fand, aber auch Satellitenerhebungen und Kammer-Begasungsexperimente einbezogen wurden. Dabei ließ sich folgendes feststellen: (1) Der Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration um ca. 100 ppm in den letzten 100 Jahren führte weltweit zu einem erhöhten Pflanzenwachstum. Die globale Vegetationsdecke erhöhte sich um ca. 11–14 %, was zu ca. 70 % dem gestiegenen Luft-CO₂-Gehalt zugeschrieben wird. Seit 1982 hat der globale Baumbestand um 7,1 % zugenommen. (2) Die experimentell kontrollierte Anhebung des Luft-CO₂-Gehaltes (in der Regel von 350 auf 550 ppm) ergab bei ausgewählten Kulturpflanzen Ertragszuwächse von 10 bis über 30 %. (3) In Deutschland stiegen die Erträge von 1990–2015 bei Weizen, Gerste, Mais und Kartoffeln um mehr als 30 % an, was teilweise auf die gestiegenen Luft-CO₂-Gehalte zurückzuführen sein dürfte. Über alle Fruchtarten hochgerechnet liegt die jährliche CO₂-Nettofestlegung in Deutschland bei 96,3 Mio. t. (4) Die CO₂-bedingten Ertragszuwächse beruhen auf einer Steigerung der Photosyntheseleistung. Sie unterlagen in Abhängigkeit von Pflanzenart, Wasserversorgung und Nährstoffangebot (vor allem von N und P) großen Schwankungen. (5) Bei schlechter Nährstoffverfügbarkeit im Boden und unzureichender Düngung kann der durch CO₂ verursachte Ertragsanstieg mit einer Verminderung der pflanzlichen Nährstoff- und Proteinkonzentrationen (vornehmlich durch „Verdünnungseffekte“) und damit mit Qualitätsbeeinträchtigung verbunden sein. Dabei nimmt N (in geringerem Maß auch P) offenbar eine Schlüsselstellung ein. Dies lässt sich durch ein angepasstes Düngungsmanagement und durch die Züchtung von trockenoleranten low-input-Sorten mit hoher Nährstoff-Verwertungseffizienz kompensieren. (6) Die CO₂-bedingten Ertragssteigerungen könnten zur Sicherung der Nahrungs- und Futtermittelproduktion für die wachsende Weltbevölkerung beitragen.

Schlagwörter: Atmosphärische CO₂-Konzentrationen, Ertragsanstieg, Nährstoffversorgung, Qualität, Vegetationsentwicklung

Summary

The relationships between increased CO₂ supply on the one hand and vegetation development, plant growth, yield and quality of different crop species on the other hand were examined on the basis of observations and experiments (meta studies) available world-wide. Special attention was paid to FACE experiments (Free-air CO₂ enrichment method), but satellite surveys and chamber fumigation systems were also included. The results are: (1) The increase of the atmospheric CO₂ concentration by about 100 ppm during the last 100 years led to increased plant growth worldwide. The global vegetation cover increased by 11–14%, which is attributed by 70% to the increased atmospheric CO₂ content. Since 1982 the global tree population has increased by 7.1%. (2) The increase of the CO₂ content in the air (typically from 350 to 550 ppm) resulted in the yield increases of selected crops from 10 to more than 30%.

(3) In Germany, from 1990 to 2015 the yields of wheat, barley, maize and potatoes increased by more than 30% which was partly due to the increased CO₂ content in the air. Across all crop species, the annual net CO₂ fixation in Germany is 96.3 million tons.

(4) The CO₂-related yield increases are based on an increase in photosynthesis performance. They were subject to large fluctuations depending on plant species, water supply and nutrient supply (especially N and P). (5) In the case of poor nutrient availability in the soil and insufficient fertilization, the CO₂ induced yield increase can be associated with a reduction in plant nutrient and protein concentrations (mainly due to "dilution effects") and thus with a reduction in quality. N (to a lesser extent also P) obviously plays a key role in this process. This can be compensated by adapted fertilization management and by breeding of drought-tolerant "low-input" varieties with high nutrient utilization efficiency. (6) The CO₂ induced yield increases should be used to secure the world's food supply and improve the income situation in poorer countries.

Keywords: atmospheric CO₂ concentrations, yield increase, nutrient supply, quality, vegetation development

1. Einleitung

Die anthropogenen Emissionen von Kohlendioxid (CO₂) betragen im Jahr 2018 weltweit 37 Mrd. t/Jahr mit steigender Tendenz (Crippa et al., 2019). Die stärksten globalen Emittenten sind in Tabelle 1 aufgeführt. Diese Emissionen werden in der Öffentlichkeit auf der Basis des vom Weltklimarat (Intergovernmental Panel of Climate Change, IPCC) vertretenen AGW-Modells (Anthropogen Global Warming Model) fast ausschließlich für die derzeitige Klimaerwärmung verantwortlich gemacht (IPCC, 2015; Schellnhuber, 2015). Sie entstehen durch die Verbrennung von Kohle, Öl und Gas in Industrie, Heizung und Verkehr. Es wird eine rasche CO₂-Emissionssenkung („Dekarbonisierung“) gefordert (EKD, 2009; Schellnhuber, 2015), sonst drohe eine Klimakatastrophe mit unübersehbaren Folgen für die Menschheit und die Ökosysteme (Wüstenausbreitung, Ernteausfälle, Hungersnöte, Abschmelzen des Polar- und Gletschereises, Überflutungen, Artensterben, Verminderung der Biodiversität). Inzwischen wird dieses atmosphärische Spurengas (derzeitige Konzentration: 0,04 %) in der Öffentlichkeit weithin als „Killer- bzw. Schmutzgas“ oder „Umweltgift“ bezeichnet. Aus natur- und agrarwissenschaftlicher Sicht und hinsichtlich der Sicherung der Welternährung ist diese Aussage nicht ausgewogen.

Erstens bestehen in der Fachwelt Unsicherheiten und Zweifel an einer starken CO₂-Klimasensitivität (definiert als Anstieg der mittleren Globaltemperatur bei Verdoppelung des atmosphärischen CO₂-Gehalts (IPCC)). Dies geht aus vielen wissenschaftlichen Publikationen (vgl. Dahm et

al., 2015; Vahrenholt und Lüning; 2020) und auch aus mindestens 30 Resolutionen hervor, die Tausende Wissenschaftler, darunter auch mehrere Nobelpreisträger, unterzeichneten (Klarsicht Information, 2019). Diese Zweifel rühren vor allem daher, dass bei einer Konzentration von 0,04 % CO₂ die für die Infrarot-Absorption relevanten Banden von 4,3 und 14,7 Mikrometer schon weitgehend gesättigt sind (Bennert et al., 2020) und neue Modellierungen für die nächsten 30 Jahre eine Erwärmungspause voraussagen (Maher et al., 2020).

Zweitens hat CO₂ in der belebten Welt eine überragende Bedeutung. Kohlenstoff ist der wichtigste Baustoff des irdischen Lebens. Im Prozess der Photosynthese bzw. CO₂-Assimilation der grünen Pflanzen werden aus CO₂ unter Nutzung von Wasser mithilfe der Sonnenenergie Kohlehydrate synthetisiert, welche die Ausgangsstoffe für weitere Grundsubstanzen (z. B. Eiweiße, Nukleinsäuren usw.) der lebenden Strukturen der Pflanzen darstellen (Schilling, 2000; Schubert, 2008; Dahm et al., 2015). Bei diesem Prozess wird Sauerstoff freigesetzt, den Tier und Mensch zum Atmen brauchen (Schönberger, 2020). Die pflanzliche Stoffbildung ist aber vor allem die Nahrungs- und Energiegrundlage für alle heterotrophen Organismen, zu denen auch der Mensch gehört. Das bedeutet, dass es ohne CO₂ kein Leben auf der Erde gäbe und für die Sicherung der Welternährung ausreichende atmosphärische CO₂-Konzentrationen erforderlich sind. Die Konzentration von 400 ppm (0,04 %) ist für die Pflanzen jedenfalls nicht optimal und sinkt in dichten Pflanzenbeständen bei Windstille nicht selten unter 100 ppm ab. CO₂ wird bei dieser Konzentration zumindest bei C₃-Pflanzen (zu denen fast alle unsere Kulturpflanzen zählen) zum entscheidenden Minimumfaktor für die pflanzliche Nettostoffproduktion (Schilling, 2000). Ihr CO₂-Kompensationspunkt (bei dem die sich photosynthetische CO₂-Fixierung und CO₂-Freisetzung durch Dunkel- und Lichtatmung die Waage halten, also keine Nettostoffbildung mehr stattfindet), liegt nämlich in Abhängigkeit von den Licht- und Temperaturbedingungen zwischen 40 und 250 ppm CO₂ (Schilling, 2000). Nur C₄-Pflanzen wie Mais und Hirse können geringere CO₂-Konzentrationen verwerten (vgl. Kapitel 4.1.). In Gewächshäusern wird deshalb seit langem zusätzlich CO₂ zugeführt, um tagsüber CO₂-Konzentrationen von ca. 1000 ppm (0,1 %) zu gewährleisten (Schilling, 2000) und dadurch Wachstum und Ertrag zu steigern. Da derzeit offenbar ein Zielkonflikt zwischen Milderung der Klimaerwärmung (Dekarbonisierung: Nullemission) und der Sicherung der Nahrungsmittel- und Futterproduktion für die wachsende Weltbevölkerung (ausreichend CO₂ für

Tabelle 1. Rangliste der CO₂-Emittenten im Jahr 2018 (Crippa et al., 2019)

Table 1. Ranking of the largest CO₂ emitters in 2018 (Crippa et al., 2019)

Ranking	Land	CO ₂ -Emissionen (Mio. t)	Globaler Anteil (%)
1.	China	11.256	29,7
2.	USA	5.275	13,9
3.	Indien	2.622	6,9
4.	Russland	1.748	4,6
5.	Japan	1.199	3,2
6.	Deutschland	753	2,0
7.	Iran	728	1,9
8.	Südkorea	685	1,8
9.	Saudi-Arabien	625	1,7
10.	Kanada	594	1,6

das Pflanzenwachstum) besteht, scheint es dringend erforderlich, die Beziehungen zwischen CO₂-Angebot einerseits und Vegetationsentwicklung, Pflanzenwachstum, Ertrag und Qualität andererseits näher zu betrachten. Das soll nachfolgend exemplarisch anhand weltweit vorliegender Beobachtungen und Experimente (Metastudien) geschehen. Dabei sind Freilanduntersuchungen von besonderer Relevanz.

2. Zunahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration und globale Vegetationsentwicklung

Der Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre um ca. 100 ppm in den letzten 100 Jahren führte weltweit zu einem erhöhten Pflanzenwachstum. Die australische Wissenschaftsagentur CSIRO hat eine satellitengestützte Studie (Donahue et al., 2013) veröffentlicht, die zeigt, dass unser Planet von 1982–2010 deutlich grüner geworden ist. Die mit Pflanzen bewachsene Fläche erhöhte sich danach um ca. 11 %. Eine weitere, ebenfalls auf Satellitenaufnahmen basierende Analyse, an der 32 Autoren aus 24 Institutionen in 8 Ländern teilhatten (Zhu et al., 2016), beziffert den Vegetationszuwachs von 1982–2009 auf 14 %, der zu ca. 70 % dem gestiegenen Luft-CO₂-Gehalt zugeschrieben wird. Dieser Zuwachs entspricht einer Fläche, die doppelt so groß wie die USA ist (Zhu et al., 2016) und betrifft laut Abschnitt A 2.3 des letzten IPCC-Berichtes Teile Asiens, Europas, Süd-Ost-Australiens, Süd- und Nordamerikas (Bernsdorf, 2019) und alle Ökosysteme einschließlich der arktischen Tundra, tropischen Regenwälder und Korallenriffe. Hervorzuheben ist besonders das Ergrünen der ariden Gebiete wie der Sahelzone südlich der Sahara (das so genannte „Sahelwunder“, Bernsdorf, 2019), deren Pflanzendecke in den letzten 30 Jahren um 8 % zunahm (Zhang und Delworth, 2006; Pausata et al., 2020). Dieses Phänomen wird vor allem den zunehmenden Niederschlagsmengen (25–50 %) zugeschrieben (Mueller, 2011), die auf eine durch die Erderwärmung bedingte höhere Luftfeuchte über dem östlichen Atlantik zurückgeführt werden (Haars et al., 2005). Ähnliche Effekte gibt es auch für andere Trockengebiete (z. B. Nordwestindien oder Australien: Zhang und Delworth, 2006; Vahrenholt und Lüning, 2020).

Auch die Waldbedeckung ist in den vergangenen 40 Jahren weltweit merklich angestiegen (Bernsdorf, 2019). Obwohl die Dezimierung tropischer Regenwälder (Brasilien, Borneo) insbesondere zur Palmöl- und Sojaversorgung von

Europa und China noch immer andauert, hat seit 1982 der globale Baumbestand netto um ca. 224 Mio. ha (7,1 %) (Song et al., 2018) zugenommen, wobei davon dem CO₂-Düngungseffekt sowie dem Klimawandel 40 % und direkten menschlichen Aktivitäten 60 % zugemessen werden.

Auch in Deutschland lässt sich seit 1960 ein beschleunigter Baumzuwachs erkennen: Buchen wachsen um 77 % schneller als vorher; bei Fichten sind es immerhin 32 % (Pretzsch et al., 2014). Als Ursachen werden neben Klimaerwärmung und N-Angebot der gestiegene CO₂-Gehalt der Luft genannt.

Auf der Basis einer modellgestützten Meta-Analyse von 138 CO₂-Steigerungsexperimenten (FACE- und Gefäßversuche, maximal 625 ppm CO₂) bei Gras-, Busch- und Ackerland bzw. Forsten postulierten Terrer et al. (2018) eine durchschnittliche Biomasse-Steigerung um 12 % (Standardabweichung: 3 %), die allerdings durch mangelnde N- bzw. P-Verfügbarkeit im Boden eingeschränkt sein kann.

3. Ertragssteigerungen bei erhöhtem CO₂-Angebot

3.1. Auswertung internationaler Versuche

Inzwischen ist weltweit eine kaum noch übersehbare Zahl von CO₂-Steigerungsversuchen durchgeführt worden, die vorwiegend auf der FACE-Methodik („Free-Air-CO₂-Enrichment“-Methode der CO₂-Anreicherung unter Freiland-Bedingungen), teilweise aber auch auf Gefäßversuchen mit begasbaren Kammern basieren und nachfolgend exemplarisch dargestellt werden sollen. In den meisten Fällen ergaben sich deutliche Ertragsteigerungen. In einer modellgestützten Simulationsanalyse zum Einfluss des Klimawandels auf die globale Nahrungsmittelproduktion zeigten Parry et al. (2004), dass die Verdopplung des CO₂-Angebots von 375 auf 750 ppm zum Ertragsanstieg von Mais (C₄-Pflanze) um 8 %, von Weizen und Reis um 18 % und von Sojabohne um 25 % führte (Abbildung 1). Solche Befunde wurden seither vielfach bestätigt. Beispielsweise fanden Ziska und Bunce (2007) vorwiegend auf der Basis amerikanischer Angaben bei CO₂-Konzentrationserhöhung von 370 auf 700 ppm Ertragszuwächse von 27 % bei Soja, 33 % bei Weizen bzw. 13 % bei Reis. Wang et al. (2013) ermittelten nach dänischen und chinesischen Angaben bei einer Zunahme des CO₂-Angebots von 450 auf 800 ppm bei Weizen einen Ertragsanstieg um 24 %.

Deutsche und schwedische FACE- und Gefäßversuche (Pleijel und Högy, 2015) ergaben bei Weizen Ertragserhöhungen von 6–7 % pro 100 ppm CO₂-Zuwachs, wobei die Kornzahl pro Flächeneinheit, nicht aber die Tausendkornmasse anstieg. Bei Reis wurde ein Ertragsanstieg von ca. 7–16 % pro 200 ppm CO₂-Erhöhung gefunden (Yang et al., 2007). Die Leguminose Mungbohne reagierte auf 550 ppm CO₂ neben Biomassezuwachs der Gesamtpflanze und der Körner von 16,9 und 25,5 % mit einer Erhöhung des Knöllchengewichtes/Pflanze von 30,1 bis 48,1 % (Li et al., 2015). Eine Zusammenfassung der weltweiten CO₂-Steigerungsversuche (nur FACE) der letzten 30 Jahre hat Kimball (2016) vorgelegt. Die Resultate finden sich in Tabelle 2.

Als Fazit lässt sich feststellen (Anbauflächen nach Statista 2020 für das Anbaujahr 2019/20): Von den anwachsenden CO₂-Konzentrationen profitieren die weltweit wichtigsten Nahrungs- und Futterkulturen Weizen (217 Mio. ha Anbaufläche), Reis (161 Mio. Anbaufläche), Mais (allerdings nur unter Trockenstressbedingungen) (192 Mio. Anbaufläche) und Sojabohne (123 Mio. Anbaufläche). Deren Erträge sind von 1990 bis 2019 erheblich angestiegen (Mais auf 300 %, Reis auf 251 %, Soja auf 244 % und Weizen auf 328 % des Ertrages von 1990; FAOSTAT, 2020).

Tabelle 2. Ertragssteigerung verschiedener Fruchtarten durch Erhöhung des CO₂-Angebots von 350 auf 559 ppm (+57 %). Weltweite Auswertung von FACE-Versuchen (Kimball, 2016)
Table 2. Yield increase of various crops by increasing the CO₂ supply from 350 to 559 ppm (+57%). Worldwide evaluation of FACE experiments (Kimball, 2016)

Fruchtart	Globaler Durchschnittsertrag (dt/ha)	Ertragszuwachs (%)
Baumwolle	164	30 und mehr
Maniok	750	30 und mehr
Mais (bei Trockenstress)	58	30 und mehr
Hirse (bei Trockenstress)	11,7	30 und mehr
Weizen	35	15–30
Gerste	30	15–30
Reis (konventionelle Sorten)	32,4	15–30
Sojabohne	28,5	15–30
Erdnuss	29,7	15–30
Kartoffel	220	15–30
Raps, Rübsen (Deutschland)	33	15–30
Reben (Deutschland)	97,5	15–30
Zuckerrübe	7,6	10–15
Kaffee (Ghana)	16,6	10–15
Weidelgras	110	10–15

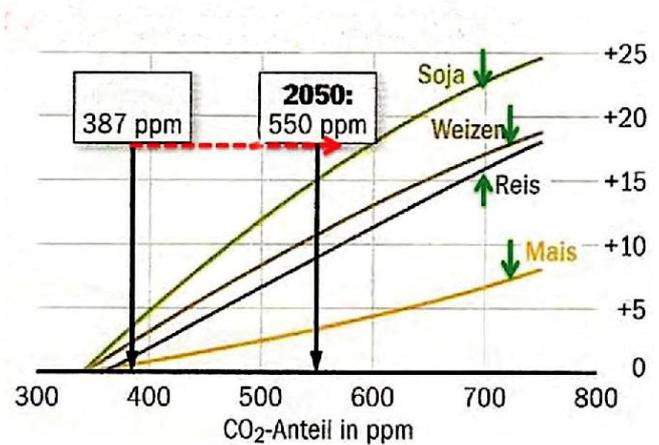


Abbildung 1. Einfluss der CO₂-Konzentration auf die relativen Erträge verschiedener Fruchtarten (zusammengestellt aus Daten von Parry et al., 2004, vgl. Bennert et al., 2020).

Figure 1. Influence of the CO₂ concentration on the relative yields of various crops (compiled from data by Parry et al., 2004, cf. Bennert et al., 2020).

Dies dürfte u. a. dazu beigetragen haben, den chronischen Hunger in der so genannten 3. Welt trotz fortdauernden Bevölkerungswachstums deutlich zu mildern.

3.2. Ertragserhöhungen in Deutschland

Die Erträge liegen in Deutschland wie in anderen Ländern Mittel- und Westeuropas wesentlich höher als weltweit, da hier die Produktionsbedingungen (Niederschläge, Düngung, Mechanisierung etc.) günstiger sind als anderswo. Dennoch haben die Erträge in Deutschland von 1990 bis 2015 bei verschiedenen Kulturen deutlich zugenommen (Tabelle 3). Allerdings zeigten sich in den letzten Jahren oftmals Abflachungen der Ertragszuwächse (vgl. prozentuale Ertragsanstiege zwischen 1990–2005 und zwischen 2005–2015 in Tabelle 3). Teilweise werden sogar Stagnationen (Gouis et al., 2020) beschrieben. Von Ausnahmejahren abgesehen, dürften derzeit aber (noch) die Anstiegstendenzen überwiegen. Nach eigenen Erhebungen lag der Winterweizenenertrag 2016 gegenüber 2002 um rund 15 % höher. Dazu hat sicherlich züchterischer Fortschritt und verbesserte Produktionstechnik beigetragen. Im gleichen Zeitraum nahm jedoch die NPK-Düngung von 4,3 (1990) auf 2,4 Mil. t (2015), also um ca. 44 % ab (Statista, 2021). Deshalb dürfte bei diesem Ertragsanstieg vermutlich auch die CO₂-Konzentrationserhöhung eine beachtliche Rolle gespielt haben (Zschaler, 2020), denn die globalen CO₂-Emissionen wuchsen von 2005 bis 2018 um 27 % (Crippa

Tabelle 3. Ausgewählte Ertragsdaten 1990 bis 2015 in Deutschland (Quelle: FAOSTAT, 2020)
Table 3. Selected yields data from 1990 to 2015 in Germany (Source: FAOSTAT, 2020)

Fruchtart	Erträge			Ertragsanstieg		
	1990	2005	2015	1990–2005	2005–2015	1990–2015
Weizen	62,7	74,7	80,9	19,1	8,3	29,0
Wintergerste	53,6	59,7	71,7	11,4	20,1	33,8
Körnermais	67,7	92,1	87,2	36,0	-5,4	28,8
Kartoffel	257,8	419,7	438,2	62,8	4,4	69,9

et al., 2019). Dafür sprechen auch die Biomassezuwächse, die im Thünen-Institut in Braunschweig und an der Universität Hohenheim bei erhöhter CO₂-Konzentration in FACE-Experimenten gefunden worden sind (Weigel et al., 2014; Pleijel und Högy, 2015), sowie die starken Ertragszuwächse im Dauerdüngungsversuch „Ewiger Roggen“ in Halle, die sogar bei den ungedüngten Varianten seit den 1990er-Jahren auftraten (Herbst et al., 2017).

In Anbetracht der hohen Ernteerträge stellt der Ackerbau in Deutschland eine starke CO₂-Senke dar (Bröker, 2020). Tabelle 4 weist die Anbauflächen, Erträge und CO₂-Bilanzen verschiedener Fruchtarten aus. Es zeigt sich, dass sich die Festlegung im Erntegut aller Kulturen auf 123,1 Mio. t beläuft. Daraus ergibt sich abzüglich der Emissionen (z. B. Dünger, Produktionsprozess, Anbau, Boden) von 26,8 Mio. t eine CO₂-Festlegung von insgesamt 96,3 Mio. t jährlich. Diese Bilanzierung wird in Deutschland für reine Ackerbaubetriebe teilweise angewendet (Breitschuh et al., 2020). Natürlich wird der fixierte C je nach Verwendungszweck (Nahrungs- und Futtermittel, Biogaserzeugung, Baustoffe) unterschiedlich zeitverzögert wieder an die Atmosphäre abgegeben. Trotzdem dürfte der Ackerbau allein wenig zu den Nettoemissionen der deutschen Landwirtschaft beitragen.

4. Mögliche Ursachen der Unterschiede in der Ertragswirkung des CO₂

Die erhöhte Luft-CO₂-Konzentration führt weltweit fast ausnahmslos zur Wachstumsförderung und zum Anstieg der pflanzlichen Biomasseproduktion. Die Ursache dafür ist die Zunahme der CO₂-Assimilation (Coskun et al., 2016), die nach Wang et al. (2013) und Leakely et al. (2004) bis zu 33 bzw. 41 % erreichen kann. Dieser Effekt lässt sich dadurch erklären, dass die derzeitige CO₂-Konzentration von 400 ppm (0,04 %) zumindest für

die Photosynthese der C₃-Pflanzen (zu denen die meisten unserer Kulturpflanzen außer Mais und Hirse zählen) unteroptimal ist (vgl. Kapitel 1) und durch das zusätzliche CO₂ verbessert werden kann.

Allerdings unterliegt diese CO₂-bedingte Steigerung der Stoffbildung großen Schwankungen. Als mögliche Ursachen dafür kommen Unterschiede bei den Pflanzenarten und -sorten, der Wasser- und der Nährstoffversorgung in Frage.

4.1. Pflanzenarten und -sorten

Mais und Hirse zeigen bei ausreichender Wasserversorgung keine (Langely und Magonigal, 2010) oder relativ geringe CO₂-Ertragseffekte (Abbildung 1, Ainsworth und Long, 2004; Weigel et al., 2014). Dies dürfte damit zusammenhängen, dass diese C₄-Pflanzen aufgrund ihres spezifischen CO₂-Fixierungsmechanismus (primär über Phosphoenolpyruvat-Carboxylase) sehr niedrige CO₂-Konzentrationen (5–10 ppm = CO₂-Kompensationspunkt) verwerten können und die CO₂-„Sättigung“ ihrer Photosynthese in der gemäßigten Klimazone (wenig Licht, niedrige Temperatur) schon bei relativ niedrigen CO₂-Konzentrationen eintritt. Bei Hitze- oder Trockenstress kann allerdings wegen der durch hohes CO₂-Angebot verursachten besseren Wassernutzungseffizienz (kg Biomassebildung pro kg Wasserverbrauch) auch bei C₄-Pflanzen ein deutlicher Ertragszuwachs eintreten (siehe Angaben für Mais und Hirse in Tabelle 2). Körnerleguminosen wie Sojabohne und Erdnuss reagieren auf erhöhtes CO₂-Angebot in der Regel mit sehr positiven Ertragseffekten (Abbildung 1, Tabelle 2) und erhöhen Knöllchenzahlen und -masse (Li et al., 2015). Wie an Erbse bzw. Weißlupine gezeigt wurde (Merbach und Schilling, 1980), vermag die Photosynthese dieser C₃-Pflanzen in der Kornfüllungsperiode den hohen C-Bedarf der wachsenden Samen und der Knöllchen nicht gleichzeitig ausreichend zu befriedigen, weshalb die N₂-Fixierung vorzeitig eingestellt und der Samenertrag wegen fehlender N-Belieferung durch

Tabelle 4. Anbauflächen, Erträge und CO₂-Bilanzen von Feldfrüchten in Deutschland (Bröker, 2020, modifiziert) (Quelle: Statistisches Bundesamt, Erträge: 2013–2018)Table 4. Cropping area, yields and CO₂ balances of crops in Germany (Bröker, 2020, modified) (Source: Statistisches Bundesamt, Yields: 2013–2018)

Kultur	Fläche (Mio. ha)	Ertrag (dt/ha)	CO ₂ -Emissionen		CO ₂ -Festlegung		CO ₂ -Bilanz (kg/ha)
			Anbau ¹ (kg/ha)	Boden ² (kg/ha)	Erntegut		
Weizen	3,3	78	1300	300	8800	7800	
Gerste	1,2	72	1200	200	7800	6800	
Roggen	0,6	56	1000	300	6200	5500	
Hafer	0,2	58	1000	200	6500	5700	
Triticale	0,4	71	1200	300	7800	6900	
Raps	1,0	36	1400	-2000	8000	4600	
Körnermais	0,5	108	1500	500	12000	11000	
Silomais	2,0	467	1600	-3000	15000	10400	
Zuckerrüben	0,4	784	1600	-4800	21000	14600	
Kartoffeln	0,3	377	2000	-3300	12000	6700	
Leguminosen	0,1	44	900	-600	6000	4500	
Feldfutter	0,3	313	1400	1200	12000	11800	
Summe	10,3		16,1 Mio. t	-10,7 Mio. t	123,1 Mio. t	96,3 Mio. t	

¹ beinhaltet alle Aufwendungen wie Herstellung von N-Düngemitteln, Anbautechnik, Pflanzenschutzmittel, etc. ² Minuszeichen bedeutet CO₂-Emission

die Knöllchen verringert wird. Zusätzliche C-Belieferung behebt durch Ankurbelung der Photosynthese (Knöllchen werden wieder mit C versorgt und können N₂ fixieren) diesen Mangel und führt zum Ertragsanstieg.

Weizen als global wichtigster Nahrungslieferant (und auch Reis oder Gerste) werden in ihrem Kornertrag durch CO₂-Erhöhung meist deutlich gefördert (Parry et al., 2004; Yang et al., 2007; Wang et al., 2015; Kimball, 2016). Das mag vielleicht darauf zurückgehen, dass viele moderne Getreidesorten einen hohen Ernteindex (Anteil des Kornertrags an der Gesamtbiomasse) haben und der damit verbundene C-Bedarf der Körner durch die Photosynthese bei 400 ppm CO₂ nicht ausreichend befriedigt werden kann. Zusätzlich angebotener Kohlenstoff wird daher assimiliert und zur Zeit der Kornfüllung gerichtet in die Körner (Syntheszentren) transportiert (Merbach et al., 1994).

Bäume werden in ihrem Wachstum durch erhöhte CO₂-Zufuhr stärker gefördert als krautige Pflanzen (Ainsworth und Long, 2004).

4.2. Wasserversorgung

Bei unzureichendem Wasserangebot vermindert sich meist der CO₂-Düngeeffekt (Wang et al., 2015). Daraus wird zuweilen geschlossen, dass die positiven CO₂-Ertragseffekte bei Trockenheit nicht zum Zuge kämen

(Dahm et al., 2015). Tatsächlich verringert Wassermangel zwar den durch CO₂-bedingten Wachstumsanstieg, aber hebt diesen nicht völlig auf, weil erhöhte CO₂-Konzentrationen den spezifischen Wasserverbrauch pro Mengeneinheit gebildeter Pflanzenbiomasse (Transpirationskoeffizient) signifikant verringern (Ainsworth und Long, 2004; Leakely et al., 2004; Wang et al., 2013; Weigel et al., 2014), was offensichtlich auch erklärt, dass der globale Biomassezuwachs von 1981 bis 2011 ohne zusätzlichen Wasserverbrauch vonstatten ging (Cheng et al., 2017). Ursache dafür ist die CO₂-bedingte Verringerung der Spaltöffnungsweite (Lüttge et al., 2002). Bei C₄-Pflanzen kommt der positive CO₂-Effekt dadurch sogar erst bei Trockenheit zum Tragen (siehe weiter oben). Außerdem erhöhte sich das Wasserangebot durch Niederschlagszunahme in der Sahelzone und anderen Trockengebieten (Zhang und Delworth, 2006; Zhu et al., 2017; Vahrenholt und Lünig, 2020) und die Wüstenausbreitung wurde gestoppt (Bernsdorf, 2019; Ljungqvist et al., 2016). Beides (höheres Wasserangebot und CO₂-bedingte effektivere Wassernutzung) hat z. B. in Mali und Burkina Faso bei Hirse zu deutlichen Ertragszunahmen geführt (Olsson et al., 2005).

4.3. Nährstoffversorgung

Schließlich spielt auch die Nährstoffversorgung der Pflanzen für die Ausprägung des Ertragseffekts erhöhter

CO₂-Konzentrationen eine wesentliche Rolle. Metaanalysen von Coskun et al. (2016) (Auswertung von mehr als 300 Originalartikeln) und Terrer et al. (2018) (Auswertung von 138 Experimenten) ergaben, dass die N-Versorgung die dominierende Bedeutung für die Höhe des CO₂-Düngungseffektes hat. Terrer et al. (2018) geben deren Anteil mit 65 % an. Abbildung 2 zeigt, dass erhöhte CO₂-Konzentration im Vergleich zur niedrigeren Ausgangskonzentration die Biomasseproduktion (Netto-Primärproduktion, NPP) steigert. Bei unzureichendem N-Angebot (gepunktete Kurve) wird dieser Effekt aber vermindert. Außerdem kommt dabei auch der P-Versorgung ein beträchtlicher Stellenwert zu (Yang et al., 2007; Terrer et al., 2018), den Terrer et al. (2018) mit ca. 25 % beziffern.

5. Einfluss erhöhter CO₂-Konzentrationen auf die Qualität bzw. die Nährstoffgehalte des Ernteguts

Im Schrifttum liegen viele Befunde vor, dass der CO₂-bedingte Ertragszuwachs mit Qualitätsverminderungen des Ernteguts einhergehen kann. So wurde bei Weizen über Absenkungen der N-Aminosäuren- und Proteinkonzentrationen (Högy und Fangmeier, 2008; Taub et al., 2008) berichtet, die auch das Kleberprotein Gluten betreffen, wodurch die Backfähigkeit von Weizenmehl beeinträchtigt wird. Konzentrationsabnahmen ließen sich auch bei einer Reihe von Makro- und Mikronährstoffen (P, K, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn) nachweisen (Fangmeier et al., 1999). Da Weizen global die wichtigste Getreideart ist, wurde daraus geschlossen, dass sich Fehlernährung (Protein- und Mineralstoffmangel) in Zukunft in den

armen Ländern verstärken könnte (Loladze, 2014). Diese Problematik wurde auch in Pressemeldungen (z. B. Dworschak, 2017) aufgegriffen („Hungern mit vollem Magen“, „Schwund“ von Nährstoffen) und eine negative Beziehung zwischen CO₂-bedingter Ertragserhöhung und den Protein- und Nährstoffgehalten postuliert, sodass der höhere Ertrag mit verringerter Qualität „erkauft“ würde.

Nähere Betrachtungen vermitteln jedoch ein differenzierteres Bild. Wie Tabelle 5 an wenigen ausgewählten Beispielen zeigt, wurden bei erhöhtem CO₂-Angebot sowohl Absenkungen als auch Anstiege von Inhaltsstoffen beobachtet. Eine Ursache dafür dürfte die unterschiedliche Nährstoffversorgung sein (vgl. Kapitel 4). Besseres Wachstum und höhere Biomasseproduktion (hier verursacht durch mehr CO₂) kann bei gleich bleibender Nährstoffzufuhr die Gehalte an Protein bzw. Mineralstoffen, insbesondere in den Kohlenhydrat speichernden Pflanzenorganen (z. B. im Getreidekorn) vermindern („Verdünnungseffekt“). Dies ist in vielen Experimenten zum Einfluss steigender CO₂-Konzentrationen gezeigt worden (Wang et al., 2013, McGrath und Lobell, 2013). Dieser Effekt tritt vor allem dann zutage, wenn essenzielle Nährstoffe ins Minimum geraten, z. B. bei ungenügendem Nährstoffvorrat des Bodens (McGrath und Lobell, 2013; Pleijel und Högy, 2015; Terrer et al., 2018) oder bei unzureichender Düngung, wobei vor allem N (Coskun et al. 2016, siehe Abbildung 2) und daneben (in geringerem Ausmaß) P (Yang et al. 2007; Terrer et al., 2018) eine Rolle spielen. Prinzipiell scheint es daher möglich zu sein, die Verringerung der N-, Protein- und Nährstoffkonzentration mithilfe eines angepassten Düngungsmanagements zu kompensieren. Ertragszuwächse durch erhöhtes CO₂-Angebot werden mit großer Wahrscheinlichkeit mit einem Anstieg des Nährstoff- bzw. Düngerangebots einhergehen

Tabelle 5. Effekte erhöhter CO₂-Konzentration auf den Nährstoffgehalt einiger Fruchtarten
Table 5. Effects of increased CO₂ concentrations on the nutritional content of some crops

Fruchtart	Effekte	Quelle
Weizen	Abnahme der N-Konzentration im Spross Abnahme der löslichen Proteine im Spross	Wang et al., 2003
Weizen	Aufnahme an Mn, Zn und Protein erhöht, Konzentrationen jedoch reduziert Abnahme der Cd-Konzentration	Pleijel und Högy, 2015
Reis	Zunahme der P-Konzentration	Yang et al., 2007
Reis	Zunahme der P-Konzentration und der P-Aufnahme	Zeng et al., 2006
Reis	Abnahme der N-Konzentration, Zunahme der N-Aufnahme	Pang et al., 2006
Mungbohne	N-Aufnahme erhöht, P und K nicht verändert oder leicht gestiegen	Li et al., 2015
Sojabohne	N-Konzentration bei jungen Pflanzen erniedrigt, bei älteren erhöht	Rogers et al., 2006
Sojabohne	N-reiche Aminosäuren und Ureide von jungen Blättern erhöht, bei alten Blättern nicht beeinflusst	Ainsworth et al., 2007

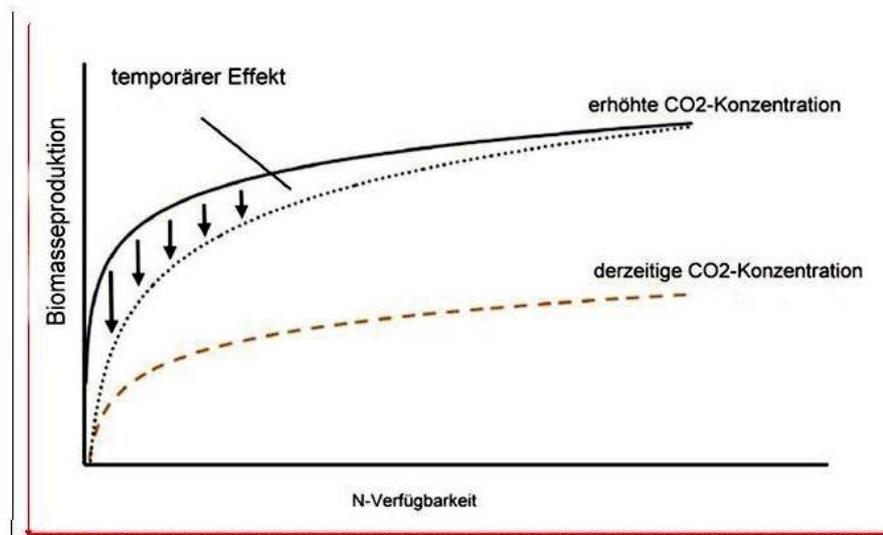


Abbildung 2. Schematische Darstellung des Einflusses des N-Angebots auf den CO₂-Düngeeffekt zur Biomasseproduktion (Coskun et al., 2016)

Figure 2. Schematic representation of the influence of the N supply on the CO₂ fertilization effect for biomass production (Coskun et al., 2016)

müssen, sofern nicht „Low-input“-Sorten mit gesteigerter Nährstoff-Effizienz zur Verfügung stehen.

Die oben vermutete negative Beziehung zwischen CO₂-bedingtem Kornertragzuwachs und der Nährstoffkonzentration dürfte daher nicht belastbar sein, denn sie war meist nur bei geringem Nährstoffangebot zu beobachten. Außerdem werden dabei die Möglichkeiten der Züchtung unterschätzt. Ein gutes Beispiel dafür ist die lange Zeit als naturwissenschaftliche Wahrheit bezeichnete negative Korrelation zwischen Proteingehalt und Ertrag bei Mais. Heute gibt es allein durch die klassische Züchtung Sorten, die hohen Proteingehalt und hohen Ertrag vereinen (Horst, persönliche Mitteilung, 2017). Ferner sind die Erträge z. B. bei Weizen durch Züchtung und Düngung in den letzten 100 Jahren in Europa verzehnfacht worden und trotzdem stiegen die Rohproteingehalte (unabhängig vom CO₂-Anstieg) beträchtlich.

Wie Tabelle 5 weiter ausweist, führt erhöhtes CO₂-Angebot neben der diskutierten und verminderten Nährstoffkonzentration oftmals zu gleichzeitiger Erhöhung der insgesamt aufgenommenen Nährstoffmenge durch die Pflanze („Nährstoffeffizienz“). Das kann als Indiz dafür gelten, dass erhöhte CO₂-Mengen neben ihrem direkten Düngeeffekt auch Einfluss auf Prozesse der pflanzlichen Stoffaufnahme und -verteilung (als Basis für den Ernteindex) und auf Vorgänge im durchwurzelten Bodenraum haben könnten.

Ebenfalls ist noch nicht endgültig geklärt, inwieweit die CO₂-verursachten Biomasseerhöhungen sich auch in der Menge der Ernteprodukte, z. B. durch eine Zunahme der Ernteindices und somit des Kornertrages, niederschlagen. Zu allen diesen Fragen sind gezielte Forschungsarbeiten erforderlich, deren Ergebnisse in die Pflanzenzüchtung einfließen müssen. Nötig ist die Züchtung auf Genotypen mit hoher Photosyntheseleistung, die das gesteigerte CO₂-Angebot effizient nutzen, starker Sink-Kapazität der Ernteorgane (Ernteindex!), hoher N-Aufnahme (Wang et al., 2013) und Nährstoffnutzungseffizienz, um zu trockenresistenten „Low-input“-Sorten zu kommen. Perspektivisch dürfte in diesem Zusammenhang auch die „Umzüchtung“ von C₃- zu C₄-Pflanzentypen eine Rolle spielen (Wang et al., 2017). Dabei können die modernen Verfahren der Biotechnologie (einschließlich des Genom-Editings) weit stärker als bisher einbezogen werden.

6. Schlussfolgerungen

- Die steigende atmosphärische CO₂-Konzentration hat zur weltweiten Vegetationszunahme und zu Ertragserhöhungen bei Feldkulturen beigetragen. CO₂ ist also kein „Schmutzgas“, sondern zusammen mit H₂O die Grundlage des irdischen Lebens.

- Um die CO₂-bedingten Ertragssteigerungen optimal zu nutzen, ist insbesondere eine stärkere Intensivierung durch eine ausreichende NPK-Düngung unter der Voraussetzung ausreichender Wasserversorgung erforderlich (Schulzke, 2014).
- Forschungsarbeiten zu den Beziehungen zwischen CO₂-Konzentrationssteigerung, pflanzlicher Nährstoffdynamik und Stoffbildung sowie den landwirtschaftlichen Erträgen sind dringend nötig und sollten staatlicherseits stärker gefördert werden.
- Eine Anpassung an die Folgen des Klimawandels, wie sie auch in der Präambel des Pariser Klimaabkommens gefordert wird, sollte unbedingt in die Pflanzenzüchtung einfließen. Dies betrifft insbesondere die Schaffung trockenresistenter und sog. „Low-input“-Sorten mit hoher Nährstoffaufnahme- und -verwertungseffizienz. Dabei können biotechnologische Verfahren (z. B. Genom-Editing) stärker genutzt werden.

Danksagung

Für die Hilfe bei der Abfassung der englischen Zusammenfassung danken wir Frau Dr. A. Weigel (Dresden). Ferner sind wir Herrn Prof. Dr. M. Körschens (Bad Lauchstädt), Herrn Prof. Dr. J. Augustin (Müncheberg), Herrn Dr. F. Herbst (Halle) und Herrn Doz. Dr. Schulze (Leipzig) für fördernde Diskussionen zu Dank verpflichtet.

Literaturverzeichnis

Ainsworth, E. A. und S. P. Long (2004): What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist* 165, 351–372.

Ainsworth, E. A., Rogers, A., Leakely, A. D. B., Heady, L. E., Gibon, Y., Stitt, M. und U. Schurr (2007): Does elevated atmospheric CO₂ alter diurnal C uptake and the balance of C and N metabolites in growing and full expanded soybean leaves? *Journal of Experimental Botany* 58, 579–591.

Bennert, W., Merbach, W., Appel, H. und H. Waniczek (2020): Kann der Mensch das „Klima retten“? 60 Fragen und Antworten zu Klimawandel und Energiewende. 5. erweiterte Aufl., Kaleidoscriptum, Erfurt.

Bernsdorf, J. (2019): Die Welt ergrünt. *Bild der Wissenschaft* 12, 14–25

Breitschuh, G., Breitschuh, T., Reinhold, G., Krause, O., Munzert, M., Döhler, H. und H. Eckert (2020): Agrar-fakten – Klimaeffekte der Landwirtschaft. www.agrafakten.de

Bröker, M. (2020): Die Bilanz: Ackerbau ist CO₂-Fixierer. *Top Agrar* 6, 64–65.

Cheng, L., Zhang, L., Wang, Y.-P., Canadall, J. G., Chiew, F. H. S., Beringer, J., Li, L., Miralles, G. D. G., Piao, S. und Y. Zhang (2017): Recent changes in terrestrial carbon uptake at little costs to the water cycle. *Nature Communications* 8, 110.

Coskun, D., Britto, D. V. und H. J. Kronzucker (2016): Nutrients constrains on terrestrial carbon fixation: The role of nitrogen. *Journal of Plant Physiology* 203, 95–109.

Crippa, M., Oreggioni, G., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Lo Vullo, E., Solazzo, E., Monforti-Ferra-rio, F., Olivier, J. G. J. und F. Vignati (2019): Fossil CO₂ and GHG emissions of all world countries – 2019 Report. Publications Office of the European Union, Luxemburg.

Dahm, K. P., Laves, D. und W. Merbach (2015): Der heutige Klimawandel. Eine kritische Analyse des Modells von der menschlich verursachten globalen Erwärmung. Dr. Köster, Berlin.

Donahue, J., Roderick, M. L., McVicar, T. R. und G. D. Farquhar (2013): Impact of CO₂ fertilization on maximum foliage cover the global's warm arid environments. *Geophysical Research Letters* 40, 3031–3035.

Dworschak, M. (2017): Hungern mit vollem Magen, *Spiegel* 42, 14.10.2017.

EKD (2009): Umkehr zum Leben. Nachhaltige Entwicklung im Zeichen des Klimawandels. Denkschrift des Kirchenamtes der Evangelischen Kirche, Gütersloher Verlagshaus, Gütersloh.

FAOSTAT (2020): Crops. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.

Fangmeier, A., Grütters, U., Högy, P., Vermehren, B. und H. J. Jäger (1999): Effects of elevated CO₂, nitrogen supply and troposphere ozone on spring wheat. II. Nutrients (N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn). *Environmental Pollution* 96, 43–59.

Gouis, le, G., Oury, F.-X. und G. Charmet (2020): How changes in climate and agricultural practices influenced

- wheat production in Western Europe. *Journal of Cereal Sciences* 93, 192960.
- Haarsmar, R., Selten, F., Weber, N. und M. Kliphuis (2005): Sahel rainfall variability and responses to green-house warming. *Geophysical Research Letter* 32, 1-4.
- Herbst, F. Schmidt, L. und W. Merbach (2017): Die Entwicklung des Ertragsniveaus im „Ewigen Roggenbau“ in Halle (Saale) seit 1879. *Journal für Kulturpflanzen* 69, 159-167
- Högy, P. und A. Fangmeier (2008): Effects of elevated atmospheric CO₂ on grain quality of wheat. *Journal Cereal Science* 48, 580–591.
- IPCC (2015): *Climate Change 2014 – Synthesis Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf.
- Kimball, B. A. (2016): Crop responses to elevated CO₂ and interaction with H₂O, N and temperature. *Current Opinion in Plant Biology* 31, 36–43.
- Klarsicht Information (2019): Es gibt keinen Konsens unter Wissenschaftlern zum anthropogenen Klimawandel. Eine Dokumentation Nr. 1, Juli 2019, <https://www.vernunftkraft-odenwald.de/wp-content/uploads/2019/10/Es-gibt-keinen-Konsens-Version-3-KLARSICHT-Information-f%C3%BCr-politische-Entscheidungstr%C3%A4ger-Nr.-1.pdf>.
- Langely, J. A. und J. P. Magonigal (2010): Ecosystem response to elevated CO₂ levels limited by nitrogen-induced shifts. *Nature* 466, 96–99.
- Li, P., Han, X., Zong, Y., Li, H., Lin, E., Han, Y. und X. Hao (2015): Effects of free-air enrichment (FACE) on the uptake and utilization of N, P and K in *Vigna radiata*. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 202, 120–125.
- Ljungqvist, F. C., Krusic, P. J., Sundqvist, H. S., Brattström, G. und D. Frank (2016): Northern hemisphere hydroclimatic variations in twelve centuries. *Nature* 532, 94–98.
- Loladze, I. (2014): Hidden shift of the ionome of plants exposed to elevated CO₂ depletes mineral at the base of human nutrition. *Life* 3, e02245.
- Lüttge, U., Kluge, M. und G. Bauer (2002): *Botanik*. 4. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim.
- Maher, N., Lehner, F. und J. Marotzke (2020): Quantifying the role of internal variability in the temperature we expect to observe in the coming decades. *Environmental Research Letters* 15, 054014.
- McGrath, L. M. und D. B. Lobell (2013): Reduction of transpiration and altered nutrient allocation contribute to nutrient decline of crops in elevated CO₂ concentrations. *Plant, Cell & Environment* 36, 697–705.
- Merbach, W. und G. Schilling (1980): Wirksamkeit der symbiontischen N₂-Fixierung der Körnerleguminosen in Abhängigkeit von Rhizobienimpfung, Substrat, N-Düngung und ¹⁴C Saccharoselieferung. *Zentralblatt für Bakteriologie, Parasitenkunde, Infektionskrankheiten und Hygiene. Zweite Naturwissenschaftliche Abteilung: Mikrobiologie der Landwirtschaft, der Technologie und des Umweltschutzes* 135, 99–118.
- Merbach, W., Schumann, F., Römer, W. und E. Reining (1994): Apparent CO₂ assimilation, ¹⁴C incorporation, and ¹⁴C translocation in spring barley influenced by sink manipulation. *Photosynthetica* 30, 593–601.
- Mueller, P. (2011): The Sahel is greening. *The Global Warming Policy Foundation. Briefing Paper Nr. 2*, 3–12.
- Olsson, L., Eklundh, L. und J. Ardo (2005): A recent greening of the Sahel – trends, patterns and potential causes. *Journal of Arid Environment* 63, 556–566.
- Parry, M. L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M. und G. Fischer (2004): Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change* 14, 53–67.
- Pausata, F. S. R., Gaetani, M., Messouri, G., Berg, A., Mala de Souza, D., Sage, R. F. und P. B. de Menocal (2020): The greening of the Sahara: Past changes and future implications. *One Earth* 3, 235–250.
- Pleijel, H. und P. Högy (2015): CO₂ dose-response function for wheat grain, protein and mineral yield based on FACE and open-top chamber experiments. *Environmental Pollution* 198, 70–77.
- Pleijel, H. und J. Uddling (2012): Yield vs. quality trade-offs for wheat in response to carbon dioxide and ozone. *Global Change Biology* 18, 596–605.
- Pretzsch, H., Biber, P., Schütze, G., Uhl, E. und T. Rötzer (2014): Forest stand growth dynamics in central Europe have accelerated since 1970. *Nature Communications* 5, 4967.
- Rogers, A., Gibon, Y., Stitt, M., Morgan, P. B., Bernacchi, C. J., Ort, D. R. und S. P. Long (2006): Increased C availability at elevated carbon dioxide concentration improve N assimilation in a legume. *Plant, Cell & Environment* 29, 1651–1658.
- Schellnhuber, H. J. (2015): Dann hausen wir in Mondstationen. *Spiegel* 45, 125–127.

- Schilling, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung. Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Schönberger, H. (2020): Die CO₂-Debatte versachlichen. *Top Agrar* 6, 66.
- Schubert, S. (2006): Pflanzenernährung. Grundwissen Bachelor. UTB, Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Schulzke, D. (2014): Ökologische Grundlagen des Getreideanbaus. Kessel, Remagen.
- Song, X.-P., Hansen, M. C., Stehman, S. V., Potapov, P. V., Tyukavina, A., Vermote, E. F. und J. R. Townshend (2018): Global Land Change from 1982 to 2016. *Nature* 560, 639–643.
- Statista (2020): Getreideertrag pro Hektar Anbaufläche der wichtigsten Getreidearten weltweit in den Jahren 1993/94 bis 2018/2019. <https://de.statista.com>.
- Statista (2021): Verbrauch von Düngemitteln in der Landwirtschaft nach Nährstoffen in den Jahren 1990-2019. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/161842/umfrage/verbrauch-ausgewaehlter-duenger-in-der-landw>.
- Taub, D., Müller, B. und H. Allen (2008): Effects of elevated CO₂ on protein concentration of food crops: A meta-analysis. *Global Change Biology* 14, 565–575.
- Terrer, C., Jackson, R. B., Prentice, I. C., Keenan, T. F., Kaiser, C., Vicca, S., Fisher, J. B., Reich, P. B., Stoecker, B. D., Hungate, B. A., Penuelas, J., McCallum, I., Soudzilovskaia, N. A., Cernusak, L. A., Talhelm, A. F., Van Sundert, K., Piao, S., Newton, P. C. D., Hoven-den, M. J., Blumenthal, D. M., Liu, Y. Y., Müller, C., Winter, K., Field, C. B., Viechtbauer, W., Van Lissa, C. J., Hoosbeek, M. R., Watanabe, M., Koike, T., Leshyk, V. O., Polley, H. W. und O. Franklin (2018): Nitrogen and phosphorus constrain the CO₂ fertilization of global plant biomass. *Nature Climate Change* 9, 684–689.
- Vahrenholt, F. und S. Lünig (2020): Unerwünschte Wahrheiten. Was Sie über den Klimawandel wissen sollten. 2. Aufl., Langen-Müller, München.
- Wang, L., Feng, Z. und J. K. Schjorring (2013): Effects of elevated atmospheric CO₂ on physiology and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.): A meta-analytic test of current hypothesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 178, 57–63.
- Wang, P., Khoshravesh, R., Karki, S., Furbank, R., Sage, T. L. und J. A. Langdale (2017): Re-creation of a key step in the evolutionary switch from C₃ to C₄. *Current Biology* 27, 3278–3287.
- Weigel, H.-J., Manderscheid, R., Fangmeier, A. und P. Högy (2014): Mehr Kohlendioxid in der Atmosphäre: Wie reagieren Kulturpflanzen? In: Lozan, J. L., Graßl, H., Karbe, L. und G. Jendritzki (Hrsg.): Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. 2. Aufl., Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg.
- Yang, L., Huang, J., Yang, H., Dong, G., Liu, H., Liu, G., Zhu, J. und Y. Wang (2007): Seasonal changes in the effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on phosphorus uptake and utilization of rice at three levels of nitrogen fertilization. *Field Crop Research* 102, 141–150.
- Yin, X. (2013): Improving ecophysiological stimulation models to predict the impact of elevated atmospheric CO₂ concentration on crop productivity. *Annals Botany* 417, 465–475.
- Zhang, R. und T. L. Delworth (2006): Impact of Atlantic multidecadal oscillations on India/Sahel rainfall and Atlantic hurricanes. *Geophysical Research Letters* 33, 17.
- Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R. B., Huang, M., Zeng, Z., Canadell, J. G., Ciais, P., Sitch, S., Friedlingstein, P., Arneeth, A., Cao, C., Cheng, L., Kato, E., Koven, C., Li, Y., Lian, X., Liu, Y., Liu, R., Mao, J., Pan, Y., Peng, S., Peuelas, J., Poulter, B., Pugh, T. A. M., Stocker, B. D., Viovy, N., Wang, X., Wang, Y., Xiao, Z., Yang, H., Zaehle, S. und N. Zeng (2016): Greening for the earth and its driver. *Nature Climate Change* 6, 791–795.
- Zeng, Q., Liu, B., Gilna, B., Zhang, Y., Zhu, C., Ma, H., Pang, J., Chen, G. und J. Zhu (2011): Elevated CO₂ effects on nutrient competition between a C₃ crop (*Oryza sativa* L.) and a C₄ weed (*Echinochloa crusgalli* L.). *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 89, 93–104.
- Ziska, L. und J. Bunce (2007): Predicting the impact of changing CO₂ on crop yields: some thoughts on food. *New Phytologist* 175, 607–618.
- Zschaler, H. (2020): Konzentrationserhöhung des CO₂ führt zu Ertragssteigerung bei Kulturpflanzen. *Top Agrar* 7, 7.