

Aus dem Institut für Agrarökologie

Hans-Joachim Weigel

Fluch oder Segen - wie verändert der Klimawandel die Pflanzenproduktion global und hierzulande?

Veröffentlicht in: Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 274

Braunschweig

Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)

2004

Fluch oder Segen – wie verändert der Klimawandel die Pflanzenproduktion global und hierzulande?

Hans-Joachim Weigel¹

1 Einführung

Die Landwirtschaft steht global vor großen Herausforderungen. Der Notwendigkeit nach mehr Nahrung für die nach wie vor schnell wachsende Zahl an Menschen steht die Notwendigkeit einer größtmöglichen Schonung der natürlichen Ressourcen gegenüber. Bereits heute ist jedoch in vielen Gebieten der Erde die Nahrungsmittelproduktion durch Bodenverluste, Bodenerosion, Anreicherung von Chemikalien, Wasserknappheit, Versalzungsprobleme etc. gefährdet. Diese Probleme werden mittelfristig weiter zunehmen. In der europäischen bzw. einheimischen Landwirtschaft werden politische und gesellschaftliche Entwicklungen (Globalisierung, EU-Erweiterung, WTO-Verhandlungen, verändertes Verbraucherverhalten etc.) ebenfalls zu Veränderungen im Agrarsektor führen. Zudem wird der technologische Fortschritt, insbesondere in der Informations- und Biotechnologie, die Landwirtschaft erheblich beeinflussen.

All diese Entwicklungen werden begleitet von und interagieren mit den Änderungen des Klimas. Wegen seiner unmittelbaren Abhängigkeit von Witterung und Klima gehört der Agrarsektor zu den sensibelsten Bereichen, die der Klimawandel in den nächsten Jahrzehnten betrifft. Es ist daher notwendig, Szenarien zu entwickeln, die die Bedeutung dieses Wandels für die Landwirtschaft beschreiben. Die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft bzw. den Agrarsektor insgesamt sind in den letzten Jahren in einer erheblichen Fülle von Studien beschrieben worden (z. B. PARRY, 1990; ROSENZWEIG and HILLEL, 1998; REILLY, 1999; REDDY and HODGES, 2000; IPCC, 2001; POLLEY, 2002). Der vorliegende Beitrag befasst sich in kurzer Form nur mit möglichen direkten Wirkungen von Klimaänderungen auf die Pflanzenproduktion vorwiegend im Bereich Ackerbau.

¹ Prof. Dr. Hans-Joachim Weigel, Institut für Agrarökologie, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, 38116 Braunschweig
E-Mail: hans.weigel@fal.de

2 Elemente des Klimawandels

Das Klima umfasst physikalische (z. B. Strahlung, Temperatur, Windgeschwindigkeit, Niederschläge) und chemische Klimaelemente (stoffliche Zusammensetzung von Luft und Niederschlägen). Änderungen dieser Klimaelemente lassen sich auf globaler, regionaler und lokaler Ebene feststellen. Die Sicherheit der Vorhersagen über zukünftige Änderungen, insbesondere zu deren Ausmaß, nimmt von der globalen zur lokalen Ebene hin ab. Das gleiche gilt für Vorhersagen von Wirkungen der Klimaänderung, insbesondere auch deshalb, weil deren Richtung und Ausmaß zusätzlich von weiteren Faktoren mitbestimmt wird. Aus den unmittelbaren, biophysikalischen bzw. physiologischen Wirkungen einzelner Klimaelemente auf die Pflanzenproduktion bzw. auf Agrarökosysteme ergeben sich Auswirkungen auf die regionale und nationale Agrarproduktion. Daraus wiederum resultieren weitergehende sozioökonomische Auswirkungen bis hin zu Effekten auf die globale Agrarproduktion und die globalen Handelsströme.

Aussagen zu Änderungen des zukünftigen Klimas beziehen sich meist auf den Zeitraum der nächsten 100 Jahre. Zugrunde gelegt werden dabei verschiedene Emissionsszenarien von Treibhausgasen, die wiederum von der zukünftigen wirtschaftlichen Gesamtentwicklung der unterschiedlichen Gesellschaften der Erde abhängen (Einzelheiten vgl. IPCC, 2001). Von Bedeutung sind sowohl Änderungen mittlerer Klimawerte als auch Änderungen der Klimavariabilität und hier insbesondere von Klimaextremen.

Die mittlere globale Temperatur soll sich je nach Emissionsszenario bis zum Jahr 2100 um 1,4 bis 5,8 °C erhöhen (IPCC 2001). Bedingt durch diese Temperaturerhöhung wird eine „Beschleunigung“ des globalen hydrologischen Kreislaufs erwartet, mit der Folge, dass die Niederschläge aus globaler Sicht tendenziell zunehmen (ca. +3,5 %).

Regional kann die Erwärmung durchaus unterschiedlich ausfallen. In Europa z. B. sollen sich die nördlichen Breitengrade etwas stärker erwärmen als der Süden. Insgesamt soll zwar auch mehr Niederschlag fallen, allerdings soll sich dieser stärker auf die Wintermonate verteilen, während die Niederschlagsmenge im Sommer abnimmt. Dies dürfte in Ländern, die bereits heute unter Wasserknappheit leiden, die Situation weiter verschärfen. Weiterhin werden Änderungen der Saisonalität der Temperaturvariabilität erwartet, d. h. zum Beispiel, dass „heiße“ Sommer häufiger und „kalte“ Winter eher seltener auftreten werden (PARRY, 2000).

In Deutschland wird die Entwicklung mittlerer Klimawerte dem globalen Trend weitgehend folgen. Die Durchschnittstemperaturen sollen in etwa im gleichen Ausmaß wie auf globaler bzw. europäischer Ebene ansteigen, allerdings in unterschiedlichem Ausmaß in den verschiedenen Landesteilen. Je nach Szenarium soll der jährliche Temperaturanstieg zwischen 0,1 bis 0,45 °C pro Dekade liegen, wobei die Erwärmung in Süddeutschland schneller von-

statten gehen könnte als im Norden. Die Niederschlagsmengen sollen im Winter, Frühjahr und Herbst zunehmen, während die Sommer eher trockener werden. Regionale Klimavorhersagen bis ca. 2050, wie die im Rahmen der bayerischen Klimastudie BayFORKLIM (ENDERS, 1999) und des für das Land Brandenburg berechneten Klimaszenariums (GERSTENGRABE, 2003), bestätigen diesen Trend steigender mittlerer Temperaturen und abnehmender Sommerniederschläge.

Im Gegensatz zu den vorausgesagten Änderungen der mittleren Klimawerte, ist die Vorhersage über das zukünftige Auftreten von Klimaextremen erheblich schwieriger. Zu den Klimaextremen zählen Frost-, Hitze- und Trockenperioden, Starkniederschläge, Hagel, Stürme, Hochwasser und Sturmfluten. Statistische Trendanalysen der letzten Jahre zeigen zwar eine Zunahme extremer Klimaereignisse an, die Vorhersage von Änderungen in der Frequenz oder in der Stärke derartiger Ereignisse für die Zukunft ist sehr unsicher (EASTERLING, 2000). Es wird jedoch von einer Zunahme von extremen Klimaereignissen (z. B. Hitzeperioden, Sommertrockenheit) ausgegangen. Klimaextreme haben besondere Bedeutung im Hinblick auf ihre Auswirkungen. Im Gegensatz zu den eher allmählich und auf globalem Niveau ablaufenden Veränderungen der mittleren Klimawerte werden extreme Klimaereignisse regional und lokal konkret wirksam und als solche eher von den Betroffenen wahrgenommen.

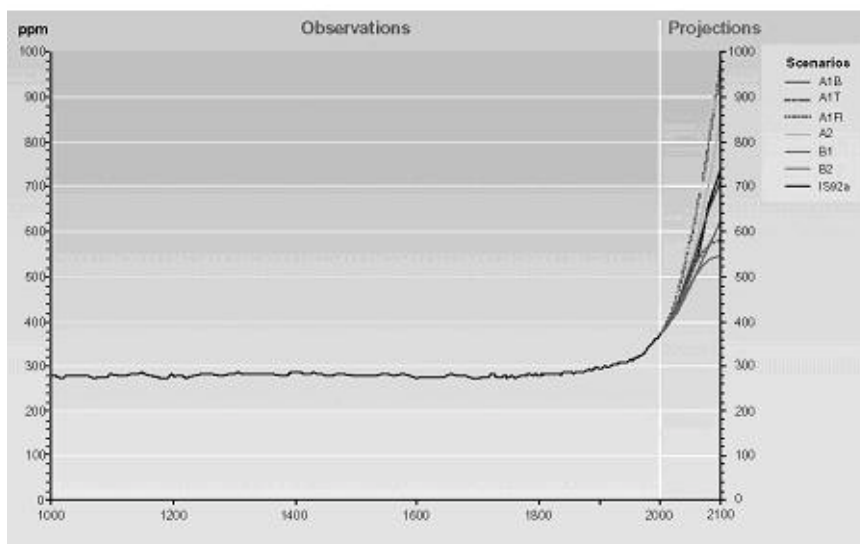
Zusätzlich zu den angesprochenen Änderungen physikalischer Klimaparameter verändert sich die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre (DÄMMGEN and WEIGEL, 1998). So haben die Konzentrationen zahlreicher Spurengase (Kohlenstoffdioxid CO_2 ; troposphärisches Ozon O_3 ; Distickstoffmonoxid/Lachgas N_2O ; Stickstoffmonoxid und -dioxid, NO/NO_2 ; Methan CH_4 ; Fluorchlorkohlenwasserstoffe) in den letzten 100 Jahren stark zugenommen (Tabelle 1). Neben Wasserdampf tragen diese Spurengase als sog. „Treibhausgase“ zur Änderung des globalen Klimas bei (Treibhauseffekt). Spurengase wie CO_2 , O_3 und NO/NO_2 wirken zusätzlich direkt auf terrestrische Ökosysteme und damit auch auf die Landwirtschaft ein, indem sie unmittelbar mit Pflanzen und Böden interagieren (DÄMMGEN and WEIGEL, 1998; LUO and MOONEY, 1999; AMTHOR, 2001; FUHRER, 2003).

Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang das Spurengas CO_2 . Während die globale CO_2 -Konzentration der Atmosphäre über > 100.000 Jahre hinweg bis etwa zum Ende des 19. Jahrhunderts bei ca. 280-290 ppm lag (PETIT et al., 1999), steigt sie seitdem rasch an und beträgt gegenwärtig bereits ca. 375 ppm. Dieser Trend wird sich mit noch größerer Intensität als bisher fortsetzen. Nach den Vorhersagen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2001) wird die CO_2 -Konzentration – je nach Emissionszenarium – in 50 Jahren bereits bei ca. 450 bis 500 ppm liegen (Abbildung 1).

Tabelle 1: Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre und Deposition von Stoffen aus der Atmosphäre (Angaben in Größenordnungen; nach verschiedenen Quellen; aus DÄMMGEN and WEIGEL 1998)

	Einheit	„historisch“	„gegenwärtig“
Konzentrationen			
CO ₂	ppm	280	365
CH ₄	ppb	800	1800
N ₂ O	ppb	285	330
O ₃	μg m ⁻³	25	50
NO ₂	μg m ⁻³	2	30
NO	μg m ⁻³	0.02	3
NH ₃	μg m ⁻³	0.05	3
SO ₂	μg m ⁻³	0.5	10
Depositionen			
NH ₄ -N	kg ha ⁻¹ a ⁻¹	2	6
NO ₃ -N	kg ha ⁻¹ a ⁻¹	2	5
SO ₄ -S	kg ha ⁻¹ a ⁻¹	1	8

Abbildung 1: Bisheriger und auf der Basis von Emissionsszenarien vorausgesagter Verlauf der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre (nach IPCC, 2001)



Der weitere Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre gehört zu den am sichersten vorhersagbaren und unausweichlichen Entwicklungen der vorausgesagten Klimaänderungen. Erhöhte CO₂-Konzentrationen führen in der Regel zu einer Stimulation der pflanzlichen Photosynthese (sog. CO₂-Düngeeffekt) und beeinflussen damit das Pflanzenwachstum prinzipiell positiv (s. u.). Tendaussagen zu anderen Spurengasen sind schwieriger. Für O₃ sagen Modelle voraus, dass dessen Konzentrationen im Laufe der nächsten 50 Jahre insbesondere in den urban-agroindustriellen Ballungsräumen der Erde mit einer Rate von 0,3 bis 1,0 %/Jahr zunehmen werden (CHAMEIDES et al., 1994). Dies dürfte z. B. in den Ländern zu erwarten sein, deren Volkswirtschaften sich entwickeln bzw. deren Schadstoffemissionen zunehmen (z. B. China, Indien, Mexiko, Ägypten).

3 Auswirkungen der Änderung einzelner Klimaelemente auf das Pflanzenwachstum

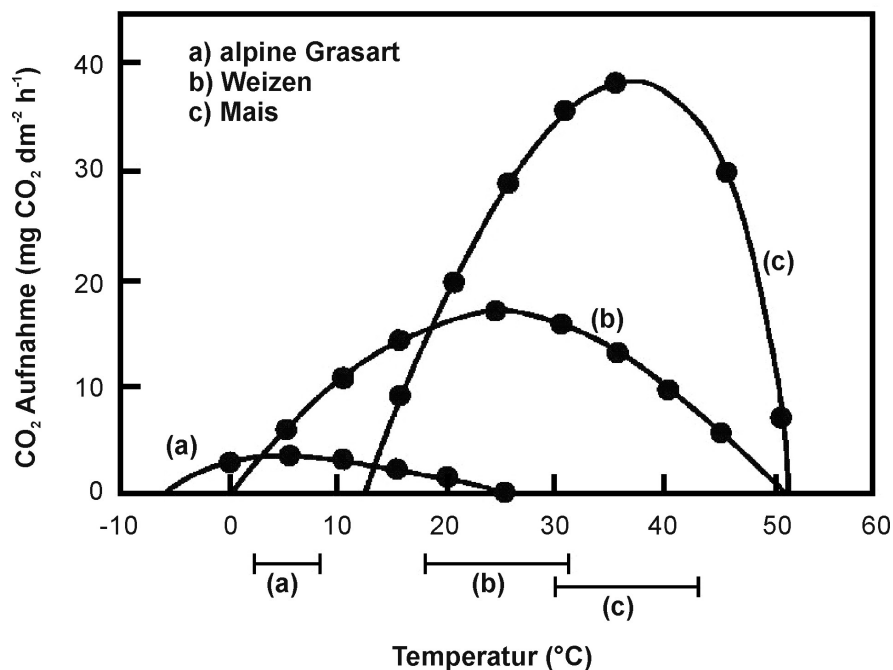
3.1 Erhöhte Temperaturen

Die Temperatur ist ein fundamentaler Faktor, der alle biologischen und chemischen Prozesse in Organismen und Ökosystemen beeinflusst. Stoffwechsel und Wachstum von Pflanzen sind durch Optimaltemperaturen gekennzeichnet, die je nach Pflanzenart (oder -sorte) bzw. je nach Standort und Herkunft sehr unterschiedlich ausgeprägt sind (Abbildung 2; EVANS, 1993). Daraus lässt sich ableiten, dass eine Temperaturerhöhung unterhalb des Optimums prinzipiell zu einer Leistungssteigerung, oberhalb des Optimums dagegen zu einer negativen Wirkung führt.

Demnach sollten positive Effekte auf die Photosynthese bzw. das Wachstum überall dort auftreten, wo die gegenwärtige Temperatur limitierend ist. Bei Pflanzen, die im Bereich ihres Temperaturoptimums wachsen, führt eine Temperaturerhöhung dagegen zu negativen Effekten. Zu beachten ist aber, dass höhere Temperaturen gleichzeitig die Dunkelatmung bzw. die Photorespiration beschleunigen, über die 40 bis 50 % des photosynthetisch assimilierten Kohlenstoffes wieder verloren gehen. Dies führt zur Verringerung des Bilanzüberschusses aus Photosynthese und Atmung und damit zu verminderten Wuchsleistungen.

Wärmere Temperaturen werden insbesondere die Entwicklungsphasen von Kulturpflanzen beeinflussen, wobei die Effekte von Entwicklungsstadien bzw. Wachstumsphasen (Keimung, Blütenbildung und -entwicklung, Reife, Dormanz, Vernalisation, Blattentfaltung) abhängen. Wärmere Winter- und Frühjahrsmonate z. B. werden in einem verstärkten Wachstum in diesen Zeiten resultieren. Arten, deren Entwicklung durch Vernalisationsprozesse bestimmt wird, können durch wärmere Temperaturen dagegen negativ beeinflusst werden.

Abbildung 2: Die Temperaturabhängigkeit der Photosyntheseleistung bei Pflanzenarten unterschiedlicher Standorte (oben) und wichtige Temperaturbereiche verschiedener Kulturpflanzenarten (unten)



Kultur	T _{opt}	T _{max}	Kältetoleranz (Wachstumsbeginn)
Weizen	17 - 23	30 - 35	4 - 6
Mais	25 - 30	32 - 37	12 - 15
Sojabohne	15 - 20	35	---
Kartoffel	15 - 20	25	8 - 10

Da eine Temperaturerhöhung auch mit einer Verlängerung der Vegetationsperiode verknüpft ist (eine Temperaturerhöhung von 2 °C bedeutet eine Verlängerung der Wachstumsperiode von ca. 2 bis 3 Wochen), werden die Erträge von Arten, die mit Wachstum reagieren, solange die Temperaturen dazu ausreichend sind (z. B. Zuckerrübe, Grünlandarten) positiv auf ansteigende Durchschnittstemperaturen reagieren. Getreidearten (Weizen, Gerste), die durch festgelegte Reife- bzw. Entwicklungsstadien gekennzeichnet sind, reagieren auf eine temperaturbedingte Entwicklungsbeschleunigung dagegen eher negativ, da hier die Entwicklung durch Wärmesummen bestimmt wird (BATTS et al., 1997; REDDY and HODGES, 2000; AMTHOR, 2001). Eine durchschnittliche Temperaturerhöhung von z. B. 1 °C kann in einer Verkürzung der Kornfüllungsphase von bis zu 10 % und damit einem entsprechenden Ertragsverlust resultieren.

Führt eine Temperaturerhöhung zur Aufhebung der Temperaturlimitierung des Wachstums, sind Verschiebungen in den Anbaugebieten zu mehr nördlichen Breitengraden (pro Grad Temperaturerhöhung ca. 100 bis 150 km nordwärts) und zu größeren Höhenlagen (pro Grad Temperaturerhöhung ca. 100 m) zu erwarten. Dies bedeutet z. B. für Europa eine Nordwärtsverschiebung der Anbaumöglichkeiten für Sommergetreide und Körnermais bzw. eine Verschiebung des Raufutteranbaus in alpinen Gebieten in höhere Lagen.

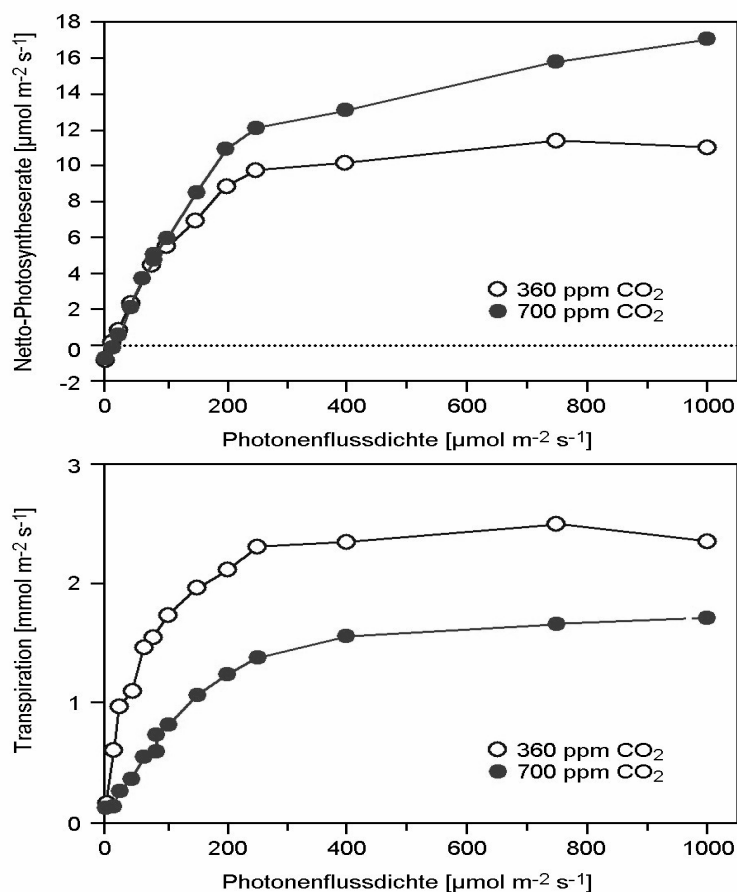
Oberhalb des art- bzw. sortenspezifischen Temperaturoptimums (Abbildung 2) werden Kulturpflanzen durch Temperaturextreme jedoch meist geschädigt (LONG and WOODWORD, 1988; EVANS, 1993). Phasen der Samen- und Fruchtbildung z. B. sind relativ temperaturempfindlich. Es ist bekannt, dass Extremtemperaturen (z. B. Hitzeperioden in den heißen Sommermonaten), die nur wenig oberhalb der Durchschnittstemperaturen liegen, die Bestäubungsvorgänge bei Getreidearten (Weizen, Reis) beeinträchtigen. Treten solche Extremereignisse vermehrt auf, muss daher mit relativ größeren Schäden gerechnet werden.

3.2 Erhöhte CO₂-Konzentrationen

CO₂ in der Atmosphäre ist einzige Kohlenstoffquelle für Pflanzen. Da die heutige CO₂-Konzentration der Atmosphäre für die meisten C₃-Pflanzen noch immer suboptimal ist, führt eine Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Umgebungsluft daher bei den meisten Pflanzenarten in der Regel unmittelbar zu einer Stimulation der Photosynthese („CO₂-Düngeeffekt“). Gleichzeitig wird die Blatttranspiration zumindest bei krautigen Pflanzenarten bzw. Kulturpflanzen reduziert (Abbildung 3). Diese primäre CO₂-Wirkung führt zu Sekundär- bzw. Folgeeffekten auf der Ebene der Einzelpflanze bis hin zum Ökosystem. Die Vielzahl der bislang beobachteten Pflanzenreaktionen kann hier nicht dargestellt werden. Häufig beobachtete Effekte sind

- eine Zunahme der Biomassebildung bzw. der Ernteerträge,
- eine Zunahme der Kohlenstoff-Verlagerung in die Wurzel (d. h. das Wurzel-/Spross-Verhältnis wird größer),
- eine Steigerung der Effizienz der Nutzung von Ressourcen (Wasser, Stickstoff und Licht), (d. h. z. B., dass die Wasserausnutzungseffizienz von Pflanzen steigt),
- eine Änderung der stofflichen Zusammensetzung des Blattgewebes (insbesondere nimmt der Gehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten zu, während der Stickstoff- bzw. Proteingehalt in vegetativen Geweben und in Samen und Früchten abnimmt),
- eine Abnahme der relativen Stressempfindlichkeit (z. B. gegenüber Trockenheit, Versalzung, Luftschadstoffen),
- eine Änderung der Struktur von Pflanzenbeständen und
- eine Änderung des Konkurrenzverhaltens in Pflanzengemeinschaften mit Auswirkungen auf die Biodiversität.

Abbildung 3: Photosynthese (oben) und Transpiration (unten) eines Sommerweizenblattes in Abhängigkeit von der eingestrahlten Lichtintensität bei gegenwärtiger (360 ppm; offene Symbole) und erhöhter (700 ppm; geschlossene Symbole) CO₂-Konzentration in der Atmosphäre (BURKART, unveröffentlicht)



Allein zur Wachstumsbeeinflussung von Kulturpflanzen liegt eine Fülle von Informationen vor, die zum überwiegenden Teil aus Experimenten stammen, die allerdings unter eher naturfernen Bedingungen (z. B. optimale Wasser- und Nährstoffversorgung) für die jeweiligen Pflanzen durchgeführt wurden (z. B. WALKER and STEFFEN, 1996; DRAKE et al., 1997; ROSENZWEIG and HILLEL, 1998; BENDER et al., 1999; REDDY and HODGES, 2000; AMTHOR, 2001). Die unter solchen Bedingungen erzielten Biomasse- und Ertragszuwächse bei Kulturpflanzenarten und -sorten sind relativ hoch, variieren allerdings auch stark (Abbildung 4; Tabelle 2).

Abbildung 4: Reaktionen von Pflanzen auf erhöhte CO₂-Konzentrationen in der Umgebungsluft: Häufigkeitsverteilung des Verhältnisses der Gesamtbiossymbiosebildung von verschiedenen Pflanzenarten ermittelt in Experimenten unter heutigen und zukünftigen (erhöhten) CO₂-Konzentrationen in der Umgebungsluft (verändert nach POORTER, 1993)

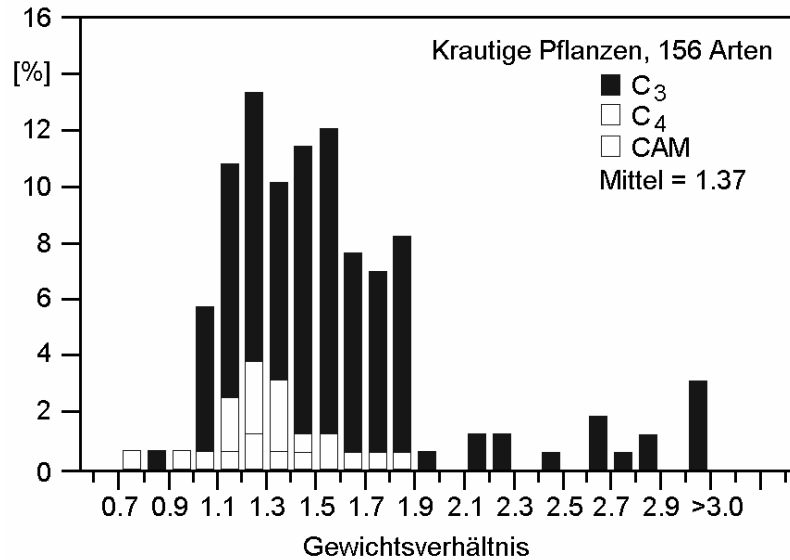


Tabelle 2: Ertragszuwächse verschiedener Sommerweizensorten ermittelt in unterschiedlichen CO₂-Anreicherungsexperimenten (OTC = open top chambers; FT = Folientunnel) (verändert nach FANGMEIER et al., 2001)

Weizen-Sorte	Anzucht	Ertragsveränderung %
Star	OTC	+ 26
Turbo	OTC	+ 35
Nandu	OTC	+ 47
Minaret	OTC	+ 32
MV 16	OTC	- 2
Hartog	FT	+ 36 / + 11
Late	FT	+ 34
Hereward	FT	+ 7 bis + 44
Hereward	FT	+ 7 bis + 168
Minaret	OTC	+ 43
Minaret	OTC	+ 35

Versuchsanstellungen unter Feldbedingungen mit sog. Freiland-CO₂-Anreicherungs-systemen (Free Air Carbondioxide Enrichment = FACE) in den USA, Japan, der Schweiz und Italien unter CO₂-Konzentrationen, wie sie im Laufe der nächsten 50 Jahre relevant sein werden, ergaben niedrigere Wachstumszuwächse (Tabelle 3) (KIMBALL et al., 2002). Ähnliche Ergebnisse wurden bei den Ertragsleistungen erzielt. Eigene Untersuchungen in Fruchtfolgen mit der FACE-Technik (550 ppm CO₂) in Braunschweig ergaben Ertragszunahmen bei Wintergerste („Theresa“), Zuckerrübe („Wiebke“) und Winterweizen („Batis“) zwischen ca. 8 bis 15 % (MANDERSCHIED et al., 2002, 2003). Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die in den nächsten Jahrzehnten zunehmende CO₂-Konzentration in der Atmosphäre grundsätzlich positiv auf die Wachstumsleistungen unserer Kulturpflanzen auswirken wird. Das Ausmaß dieser positiven Wirkung ist allerdings noch unsicher.

Tabelle 3: Oberirdische Gesamtbiomassebildung von Kulturpflanzenarten ermittelt aus verschiedenen FACE-Versuchen (n = 7-8) unter Feldbedingungen in verschiedenen Ländern (verändert nach KIMBALL et al., 2002)

Pflanzenart	Mittlere Veränderung durch CO ₂ in %
C3-Gräser:	Weizen, Reis, Weidelgras Kartoffel
Leguminosen:	Klee, Luzerne
Mehrfährige:	Wein, Baumwolle

Ein zukünftig wärmeres Klima soll die Evapotranspiration von Pflanzenbeständen erhöhen und damit auch mehr Probleme mit Bodentrockenheit bzw. Trockenstress verursachen. Dies wird insbesondere in den Regionen auftreten, wo die Wasserversorgung bereits heute limitiert ist. Zahlreiche Versuche vorwiegend mit krautigen Pflanzen haben aber gezeigt, dass die Evapotranspiration bzw. der Wasserverbrauch von Kulturpflanzen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen abnehmen bzw. dass die Wasserausnutzungseffizienz sowie die relative Empfindlichkeit gegenüber Trockenstress ansteigen (KIMBALL et al., 2002; KANG et al., 2002; POLLEY, 2002, Tabelle 4). Unter erhöhten CO₂-Bedingungen wurden zudem erhöhte Bodenfeuchten festgestellt. Diese CO₂-Wirkung auf den pflanzlichen Bestandwasserhaushalt deutet auf einen weiteren positiven Effekt hin, der negative, durch hohe Temperaturen verursachte erhöhte Verdunstungsraten abmildern könnte.

Eine in fast allen Studien zum „CO₂-Düngeeffekt“ beobachtete Reaktion ist die Veränderung der chemischen Zusammensetzung des pflanzlichen Gewebes (IDSO and IDSO, 2001). Betroffen sind sowohl der Gehalt an Makro- und Mikroelementen als auch die Konzentrationen sonstiger Inhaltsstoffe (z. B. Zucker, Vitamine, sekundäre Pflanzenstoffe). Herausragendes Beispiel dafür ist die Reduktion des Stickstoffgehaltes sowohl in vegetativen Organen (Blatt, Stengel) als auch in Früchten, Samen bzw. Körnern (COTRUFO et al., 1998;

WEIGEL and MANDERSCHIED, 2004). Daraus ergeben sich einerseits negative Konsequenzen der CO₂-Erhöhung im Hinblick auf die Produktqualität (z. B. Kornqualität bei Weizen; Futterqualität bei Grünlandarten). Andererseits führt die Änderung der Qualität der Wirtspflanze zur Veränderung der Nahrungsquelle für herbivore Insekten bzw. für sonstige Schaderreger (s. u.). Aus ökologischer Sicht kann das erweiterte C-/N-Verhältnis der anfallenden pflanzlichen Rückstände den Streuabbau im Boden verzögern. Eine Zusammenfassung eigener Arbeiten zur Wirkung erhöhter CO₂-Konzentrationen auf die Qualität von Grünland- und Getreidearten findet sich bei WEIGEL and MANDERSCHIED (2004).

Tabelle 4: Wirkung einer CO₂-Anreicherung auf die Wasserausnutzungseffizienz (WNE; g Trockenmasse pro kg Wasser) von Sommerweizen bei ausreichender und reduzierter Wasserversorgung. Die Untersuchung wurde in Open-top-Kammern im Feld durchgeführt (nach MANDERSCHIED et al., unveröffentlicht)

Jahr	Wasser- versorgung	„Normal“ CO ₂	670 ppm CO ₂	CO ₂ -Effekt %
1998	Ausreichend	4,88	6,22	+ 27
	Reduziert	5,30	7,59	+ 43
1999	Ausreichend	4,08	4,64	+ 14
	Reduziert	4,10	6,98	+ 70

3.3 Interaktionen zwischen Temperatur und erhöhten CO₂-Konzentrationen

Da die mittleren Temperaturen und die atmosphärische CO₂-Konzentration gleichzeitig zunehmen, interessiert, wie diese beiden Klimavariablen in Wechselwirkung treten könnten. Aus der Biochemie der CO₂-Fixierung lässt sich ableiten, dass die Stimulation der Photosyntheserate durch erhöhte CO₂-Konzentrationen mit steigender Temperatur zunehmen sollte, was in bestimmten Temperaturbereichen auch experimentell belegt worden ist (LONG, 1991). Entsprechende Synergieeffekte wurden auf der Ebene der Gesamtbiomasse-reaktion bzw. des Ertrages von Pflanzen allerdings nicht immer beobachtet. Innerhalb eines bestimmten (relativ niedrigen) Temperaturbereichs nimmt der positive Wachstumseffekt der hohen CO₂-Konzentrationen mit steigender Temperatur jedoch im Allgemeinen zu. Demgegenüber ergaben einige Untersuchungen, dass der o. g. negative Effekt erhöhter Temperaturen auf Getreideerträge durch den positiven CO₂-Effekt kompensiert werden kann (WHEELER et al., 1996; AMTHOR, 2001). Hier gibt es jedoch starke artspezifische Unterschiede.

Die geschilderte Interaktion spielt eine wichtige Rolle bei der Bewertung der Folgen von Klimaänderungen (Temperatur; Niederschlag) für die Ernteerträge auf lokaler, regionaler und globaler Ebene. Je nachdem, ob der physiologische CO₂-Effekt in entsprechenden Pflanzenwachstums- bzw. Ertragsmodellen berücksichtigt wird oder nicht, kann sowohl die Richtung als auch das Ausmaß der vorausgesagten Effekte variieren. Negative Ertragseffekte bei Getreide z. B., die allein aufgrund erhöhter Temperaturen (und schlechterer Wasserversorgung) berechnet werden, fallen wesentlich geringer aus bzw. kehren sich in positive Wirkungen um, wenn der CO₂-Düngeeffekt in die Bewertung mit einbezogen wird (HULME et al., 1999).

3.4 Sonstige Interaktionen

Von den zahlreichen weiteren Klima- bzw. Wachstumsfaktoren (Strahlung, Wasser- und Nährstoffversorgung, arten- und sortenspezifische Reaktionen etc.), die in ihrer Wechselwirkung für eine Vorhersage von Effekten einer Klimaänderung auf die Pflanzenproduktion zusätzlich berücksichtigt werden müssen, sollen hier nur zwei angesprochen werden.

Phytotoxische O₃-Konzentrationen in der bodennahen Atmosphäre beeinträchtigen nach wie vor in vielen Teilen der Erde das Wachstum von Kulturpflanzen (FUHRER and BOOKER, 2003). Das Schadgas O₃ wird ebenso wie CO₂ über Spaltöffnungen der Blätter in die Pflanze aufgenommen. Daraus lässt sich folgern, dass beide Gase in Wechselwirkung treten sollten: experimentelle Studien konnten zeigen, dass hohe CO₂-Konzentrationen Pflanzen vor O₃ „schützen“ bzw. dass positive CO₂-Wirkungen in Anwesenheit phytotoxischer O₃-Konzentrationen abgeschwächt werden. Die dieser Interaktion zugrunde liegenden Wirkmechanismen beruhen z. T. auf einer Reduktion der Spaltöffnungsweiten (s. o.), z. T. auf einer Erhöhung der antioxidativ wirkenden Kapazitäten der Pflanzen durch hohe CO₂-Konzentrationen (WEIGEL, 2003). In Regionen mit hoher sommerlicher O₃-Belastung könnten damit die positiven Wirkungen einer CO₂-Erhöhung nicht voll wirksam werden könnten, woraus sich wiederum ableiten lässt, dass die Wirkung des CO₂-Düngeeffektes nicht isoliert betrachtet werden kann.

Pflanzenkrankheiten gehören zu den größten Risiken in der Agrarproduktion. Das Ausmaß ihres Auftretens wird stark von Witterungseinflüssen (Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchte, Strahlung etc.) beeinflusst, da diese Faktoren sowohl die Anfälligkeit der Wirtspflanze als auch Wachstum sowie Überdauerungs- und Ausbreitungsvermögen der Schaderreger bestimmen. Änderungen der o. g. Klimafaktoren werden sich daher auch auf dieses Beziehungsgeflecht auswirken. Im Zusammenhang mit der Bewertung der Folgen von Klimaänderungen ist diesem Problem allerdings bisher vergleichsweise wenig Aufmerksamkeit geschenkt worden. So fehlt z. B. in den vielen Studien zur Klimafolgenabschätzung dieser Aspekt völlig. Nahezu alle Agrarsektoren (Ackerbau, Grünland, Gartenbau, Forst-

wirtschaft) sind empfindlich gegenüber Veränderungen im Auftreten von Pflanzenkrankheiten, Pathogenen oder Parasiten (Unkräuter, bakterielle, pilzliche und virale Pflanzenkrankheiten, Insekten/Schädlinge, invasive gebietsfremde Arten etc.), die sich aus einem veränderten Klima ergeben (CHAKRABORTY and PANGGA, 2003). Dabei spielen die Reaktionen der Wirtspflanzen auf die Veränderung eine entscheidende Rolle.

Trockenere, heißere Sommer werden z. B. die Infektionsgefahr für bestimmte Pilzkrankheiten eher reduzieren, da diese eher unter feuchtwarmen Bedingungen auftreten. Treten in Zukunft mildere Wintertemperaturen auf, würden dagegen andere Krankheiten (z. B. Cercospora-Blattfleckenkrankheit, echter Mehltau, Zwergrost, Rhizomania) begünstigt (PATTERSON et al., 1999). Auch die Überlebensrate tierischer Schädlinge könnte steigen, was größere Populationen im Frühjahr und höhere Schäden an den Wirtspflanzen während der Vegetationsperiode zur Folge hätte. Höhere Durchschnittstemperaturen könnten weiterhin dazu führen, dass Pflanzenkrankheiten in Regionen der höheren Breiten auftreten, in denen sie bislang eher nicht bekannt waren.

Änderungen chemischer Klimafaktoren (erhöhte Konzentrationen von CO₂, O₃) wirken direkt auf die pflanzliche Qualität und beeinflussen damit die Empfindlichkeit gegenüber Schaderregern bzw. Insekten. Die durch hohe CO₂-Konzentrationen verursachte Reduktion der Blattstickstoffgehalte bei gleichzeitiger Zunahme löslicher Kohlenhydrate resultierte in experimentellen Studien in einem verstärkten Konsum von Blattmaterial durch herbivore Insekten. Saugende Insekten sollen dagegen durch die durch hohe CO₂-Konzentrationen veränderte Blattmorphologie („dickere“ Blätter) eher behindert werden. Die unterschiedliche Reaktion von C₃- und C₄-Pflanzen auf erhöhte CO₂-Konzentrationen könnte zu veränderten Verhältnissen zwischen Nutzpflanzen und Unkräutern führen: viele Unkräuter gehören dem C₄-Typ an und in vielen Experimenten wurde das Wachstum von C₃-Pflanzen auf Kosten von C₄-Pflanzen durch hohe CO₂-Konzentrationen begünstigt. Weitere mögliche Implikationen eines Klimawandels für Pflanzenkrankheiten sind z. B. bei PORTER et al. (1991), LINCOLN et al. (1993), MANNING and v. TIEDEMANN (1995), PATTERSON (1995) sowie COAKLEY et al. (1999) beschrieben.

4 Anpassungen

Die Landwirtschaft hat Möglichkeiten zur Anpassung an sich ändernde Klimabedingungen. Anpassung kann in diesem Zusammenhang beschrieben werden als autonome (d. h. private) Anpassung des Landwirtes bzw. des Betriebes an sich ändernde Temperaturen, Niederschläge oder atmosphärische Spurengaskonzentrationen. Diese werden meist eher kurzfristig entwickelt und angewandt und nicht durch externe Einflüsse (Politik, Forschung) vorgegeben bzw. gesteuert. Eine geplante Anpassung umfasst dagegen gezielte Maßnahmen oder Strategien, die z. B. seitens der Politik entwickelt werden, um Kapazitäten des Agrar-

sektors gezielt zu ändern, zu beeinflussen bzw. aufzubauen. Dazu zählen u. a. längerfristig wirksame strukturelle Anpassungen (z. B. Züchtung neuer Sorten, Entwicklung neuer Landnutzungstechniken).

Zu den für die Betriebsebene bzw. den pflanzenbaulichen Bereich relevanten, häufig genannten Kategorien von Anpassungsmaßnahmen zählen z. B. (SCHNEIDER et al., 2000)

- Änderungen der Aussattermine,
- Wahl alternativer Arten und Sorten,
- Einsatz neuer Arten und Sorten,
- Änderungen des Wassermanagements bzw. der Bewässerungsmaßnahmen
- Änderungen sonstiger Inputgrößen (Dünger, Bodenbearbeitung, Korntrocknung, Fruchtfolgegestaltung etc.).

Berücksichtigt werden muss in diesem Zusammenhang auch, dass der technologische Fortschritt als solcher (z. B. im Bereich der Biotechnologie) Beiträge leisten wird, um mit möglichen Folgen der Klimaänderung umzugehen. Dazu gibt es durchaus optimistische Vorstellungen, wie in Tabelle 5 beispielhaft gezeigt wird.

Tabelle 5: Auswahl expertengestützter Vorhersagen über Entwicklungen des Sektors Landwirtschaft und Ernährung im Rahmen der Studie zur globalen Entwicklung von Wissenschaft und Technik, die Bezug zur Thematik Klimaänderung haben (DELPHI, 1998) (CUHLS et al., 2002)

-
- . Züchtungen von Pflanzen, die gegen Trockenheit und Salz beständig sind und einen Schutz gegen eine Ausbreitung der Wüste darstellen, finden praktische Anwendung.
 - . Der Wasserverbrauch von Kulturpflanzen wird durch Züchtung von 300-500 l/kg erzeugter Biomasse auf 100-200 l/kg gesenkt.
 - . Die Entwicklungsdauer von Nutzpflanzen kann gezielt verkürzt werden, so dass mehr als eine Ernte bzw. die Verschiebung der Anbauregionen in nördlichere Breiten möglich wird.
 - . Durch den Einbau von Frostschutz-Genen in Nutzpflanzen kann im Frühjahr auf den Einsatz von Abdeckfolien bzw. die Anzucht in Treibhäusern verzichtet werden.
 - . Das Auftreten der wichtigsten Schädlinge kann vorausgesagt und ein umfassendes Schutzsystem entwickelt werden.
 - . Die Klimaveränderung und entsprechende agrartechnische Entwicklungen haben die Nahrungspflanzenproduktion in die nördlicheren Regionen der Erde und in Höhenlagen über 600 m verlagert.
-

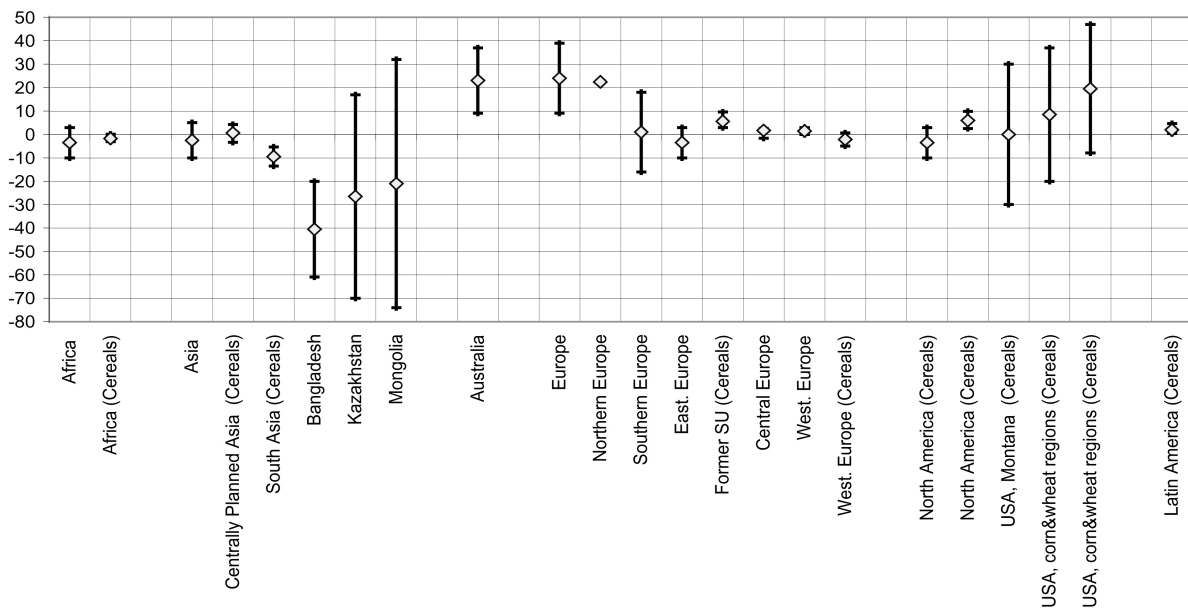
Grundsätzlich setzen erfolgreiche Anpassungsmaßnahmen voraus, dass eine Klimaänderung von den Akteuren auch als eine tatsächliche **Änderung des Klimas** und nicht als **Klimavariabilität** wahrgenommen wird, dass sie rechtzeitig eingeleitet werden und dass ausreichend Ressourcen zur Verfügung stehen, um die Anpassung umzusetzen. Im Hinblick auf diese Ressourcenverfügbarkeit gehen modellgestützte Vorhersagen zur Auswirkung von Klimaänderungen auf den Agrarsektor, die explizit Anpassungsstrategien in ihren Szenarien berücksichtigen, davon aus, dass die Möglichkeiten zur effektiven Anpassung der Landwirtschaft in den entwickelten Ländern der mittleren Breitengrade am größten und in den Entwicklungsländern der südlichen Breitengrade am geringsten sind (PARRY et al., 1999).

5 Wirkungen auf die Agrarproduktion

Die auf der biophysikalisch-physiologischen Ebene ablaufenden Wechselwirkungen von Klimaänderungen mit dem Pflanzenwachstum resultieren auf der nächst höheren Ebene in Veränderungen der pflanzlichen Agrarproduktion insgesamt. Produktionsänderungen im Allgemeinen werden von Faktoren geleitet, zu denen das Betriebsmanagement (z. B. Sortenwahl, Düngung, Pflanzenschutz), die Verfügbarkeit von Ressourcen (z. B. Bodenqualität) sowie Angebots-/Nachfrage-Gleichgewichte (z. B. resultierend aus Verbraucherpräferenzen) gehören. Im Hinblick auf die Folgen von Klimaänderungen gilt es daher, den Einfluss einer Klimaänderung unabhängig von den Entwicklungen dieser anderen Faktoren abzuschätzen. Für derartige Abschätzungen werden unterschiedliche Modelle herangezogen. Modellansätze, die biophysikalisch-physiologisch basierte Pflanzenwachstumsmodelle mit ökonomischen Modellen koppeln, spielen eine wichtige Rolle. Unter Annahme unterschiedlicher Klimaszenarien, die wiederum auf globalen Zirkulationsmodellen (GCM) basieren, haben zahlreiche „Klima-Impakt-Studien“ die Folgen eines Klimawandels auf die globalen (ROSENZWEIG and PARRY, 1994; DARWIN et al., 1999) sowie auf regionale (USA, Europa, einzelne Länder) Erträge (ADAMS, 1999; HARRISON et al., 2000; BINDI and OLESEN, 2000) modelliert. In diesen Studien wurden teilweise Anpassungsszenarien bzw. direkte physiologische CO₂-Wirkungen mitberücksichtigt.

In Abbildung 5 sind Ergebnisse dieser Abschätzungen stark aggregiert beispielhaft für Getreide bzw. Weizen als relative Veränderungen dargestellt. Es wird deutlich, dass für einige Entwicklungsländer der tropischen bzw. subtropischen Regionen mit starken Ertragseinbußen gerechnet werden muss, sofern sich die Klimabedingungen in den in Kapitel 2 genannten Größenordnungen ändern. Dagegen kann für die Kontinente Australien, Europa und Nordamerika im Mittel durchaus mit Ertragszunahmen bzw. mit keinen bedeutenden Veränderungen gerechnet werden. Allerdings werden für einzelne Regionen Europas und Nordamerikas Produktionsverluste in der Größenordnung >10 % vorausgesagt.

Abbildung 5: Relative Änderung der Getreide- bzw. Weizenerträge in unterschiedlichen Kontinenten, Ländern und Regionen der Erde. Die Streubalken geben die Spannbreite möglicher Änderungen an, die sich aus der Stärke der Klimaänderung ergibt, die mittels gekoppelter Klimamodelle (GCM) berechnet wurden (n. verschiedenen Autoren)



Mögliche Folgen eines Klimawandels für die einheimische Landwirtschaft mit ihren jeweiligen regionaltypischen Besonderheiten sind bisher noch nicht systematisch untersucht worden. Unter Annahme einer grundsätzlich positiven Wirkung steigender atmosphärischer CO₂-Konzentrationen und mäßig ansteigender Durchschnittstemperaturen, die eher wachstumsfördernd sein dürften, könnte auf ausreichend mit Wasser versorgten Standorten mit eher positiven Wirkungen gerechnet werden. Das deutlich trockenere Klima im Osten Deutschlands ist jedoch bereits heute ein stark ertragslimitierender Faktor. Zunehmende Durchschnittstemperaturen werden hier zu einer weiteren Anspannung des Wasserhaushaltes führen. Die im Rahmen der sog. Brandenburg-Studie berechneten Szenarien (GERSTENGRABE, et al. 2003) zeigen daher auch, dass bereits bei relativ geringen Zunahmen der Durchschnittstemperaturen (+ ca. 1,0 bis 1,5 °C) und bei Abnahme der Sommerniederschläge die Winterweizenerträge bis 2030 – trotz angenommener positiver CO₂-Wirkung auf die Wuchsleistung der Pflanzen – um ca. 17 % gegenüber dem heutigen Niveau abnehmen könnten.

6 Schlussfolgerung

Ändern sich die mittleren Klimawerte in der vorausgesagten Weise, wird dies für die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion der meisten entwickelten Industrienationen in den nächsten 2 bis 3 Jahrzehnten verkraftbar sein. Die gleichzeitige weitere Zunahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration wird sich generell positiv auf das Pflanzenwachstum auswirken. Dieser Effekt könnte bei gezielter Suche nach Arten und Sorten mit größtmöglicher Reaktion bzw. bei angepasstem Management noch weiter optimiert werden. Heutige Kulturpflanzenarten, die über die letzten 5.000 bis 8.000 Jahre züchterisch entwickelt wurden, tragen in ihrem Genom keine Information zur optimalen Nutzung dieser zusätzlichen Kohlenstoffquelle. Der CO₂-Effekt wirkt negativen Wachstumseffekten, die z. B. aus erhöhten Temperaturen und reduzierter Wasserverfügbarkeit resultieren, teilweise entgegen. In Ländern der gemäßigten Klimazonen (z. B. in Mittel- und Nordeuropa) sind – bei nur wenig veränderten Niederschlagsbedingungen – aufgrund des positiven CO₂-Effektes und positiver Temperaturwirkungen (verlängerte Vegetationsperioden, mildere Kälteperioden) Zunahmen des Pflanzenwachstums durchaus möglich.

Die Vorhersage einer Veränderung in der Frequenz und Stärke des Auftretens extremer Klimaereignisse ist für einen konkreten Raum schwierig. Die negativen Folgen derartiger Extremereignisse für das pflanzliche Wachstum (z. B. Hitze- und Trockenheit, Überflutung, Stauunässe) sind vom Wirkmechanismus her aus Untersuchungen zur Stressphysiologie bei Pflanzen im Prinzip bekannt (SCHULZE et al., 2002).

Eine Bewältigung der anstehenden Klimaänderungen gelingt bei rechtzeitiger Anpassung. Dazu müssen seitens der Wissenschaft Szenarien möglicher Folgen und möglicher Anpassungsstrategien entwickelt werden. Andererseits muss bei den Betroffenen (d. h. den Landwirten) die Erkenntnis greifen, dass eine tatsächliche Änderung des Klimas im Gange ist bzw. bevorsteht. Weiterhin müssen die Ressourcen zur Verfügung stehen, die Anpassung auch umzusetzen. Kosten-Nutzen-Betrachtungen zu diesem Punkt sind notwendig. Für Entwicklungsländer, die Landwirtschaft bereits heute schon in klimatisch ungünstigen Regionen betreiben müssen, stehen viele Anpassungsoptionen nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung. Hier sind negative Folgen des Klimawandels zu erwarten.

Die meisten der bisherigen wissenschaftlichen Einschätzungen über mögliche Folgen des Klimawandels auf die Pflanzenproduktion beruhen auf monofaktoriellen Untersuchungen, d. h. in den jeweiligen Szenarien wurde jeweils nur eine Klimavariante als Einflussgröße berücksichtigt. Wechselwirkungen verschiedener Klimaparameter untereinander (Temperatur, Wasserversorgung, CO₂-Konzentration, Luftschadstoffe etc.) sind kaum untersucht worden. Zudem sind indirekte Effekte, die sich aus der Interaktion mit Pflanzenkrankheiten und dem landwirtschaftlichen Management (Düngung, Sortenspezifität, Bodenbearbeitung)

ergeben könnten, zu wenig berücksichtigt worden. Weiterhin ist es notwendig, die Folgen von Klimaänderungen für die Qualität pflanzlicher Produkte stärker als bisher zu beachten.

Klimaänderungen (Temperaturen, Niederschläge, CO₂- und O₃-Konzentrationen) beeinflussen jedoch auch direkt oder indirekt die Systemeigenschaften von Agrarflächen, z. B. die Wasser- und Stoffkreisläufe sowie chemische und biologische Bodenkenngrößen. Hierzu besteht weiterer Informations- bzw. Forschungsbedarf. Stärker als bisher muss zudem der technologische Fortschritt in der landwirtschaftlichen Produktion berücksichtigt werden: nicht nur das Klima des Jahres 2050 wird anders sein als heute, auch die Produktionsverfahren werden sich bis dahin deutlich ändern. Bisherige Klimawirkungsstudien haben in der Regel zu einseitig heutige Produktionsverfahren mit einem zukünftigen Klima verknüpft.

Literaturverzeichnis

- ADAMS RA (1999) Economic effects of climate change on US agriculture. In: MENDELSON R, NEUMAN JE (eds.) *The Impact of climate change on the United States economy*. Cambridge University Press, Cambridge (UK), New York, Melbourne
- AMTHOR JS (2001) Effects of atmospheric CO₂ concentration on wheat yield: review of results from experiments using various approaches to control CO₂ concentration. *Field Crops Res.* 73: 1-34
- BATTS GR, MORISON JIL, ELLIS RH, HADLEY P, WHEELER TR (1997) Effects of CO₂ and temperature on growth and yield of crops of winter wheat over several seasons. *Eur. J. Agron.* 7: 43-52
- BENDER J, HERTSTEIN U, BLACK CR (1999) Growth and yield responses of spring wheat to increasing carbon dioxide, ozone and physiological stresses: a statistical analysis of ESPACE wheat results. *Eur. J. Agron.* 10: 185-196
- BINDI M, OLESEN JE (2000) Agriculture. In: PARRY M (ed.) *Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe*. Jackson Environment Institute, University of East Anglia, UK. p. 155-176
- BUNCE JA, ZISKA LH (2000) Crop ecosystem responses to climatic change: crop/weed interactions. In: REDDY KR, HODGES HF (eds.) *Climate Change and Global Crop Productivity*. CABI Publishing, Wallingford, UK, 333-352
- CHAKRABORTY SM, PANGGA IB (2003) Plant diseases and climate change. In: *Plant Microbiology*. HOLMES A, GILLINGS M (eds), Bios Scientific Publishers, Oxford, UK
- CHAMEIDES WL, KASIBHATA PS, YIENGER J, LEVY H (1994) Growth of continental-scale metro-agroplexes, regional ozone pollution and world food supply. *Science* 264: 74-77

- COAKLEY SM, SCHERM H, CHAKRABORTY S (1999) Climate change and plant disease management. *Ann. Rev. Phytopathol.* 37: 399-426
- COTRUFO MF, INESON P, SCOTT A (1998) Elevated CO₂ reduces the nitrogen concentration of plant tissue. *Global Change Biology* 4: 43-54
- CUHLS K, BLIND K, GRUPP H (2002) Innovations for our future. Delphi '98: New Foresight on Science and Technology. Physica-Verlag
- DÄMMGEN U, WEIGEL HJ (1998) Trends in atmospheric composition (nutrients and pollutants) and their interaction with agroecosystems. In: Sustainable agriculture for food, energy and industry. James & James Science Publishers Ltd., pp 85-93
- DARWIN R, TSIGAS M, LEWANDROWSKI J, RANESSES A (1999) Climate change, world agriculture and land use. In: FRISVOLD G, KOHN B (eds.) Global environmental change and agriculture: assessing the impacts. Edward Elgar Publishing
- DRAKE BG, GONZALEZ MELER MA, LONG SP (1997) More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO₂? *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 48: 609-639
- EASTERLING DR (2000) Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review. *Bulletin of the American Meteorological Society* 81: 417-245
- ENDERS G (1999) BayFORKLIM – Klimaänderungen in Bayern und ihre Auswirkungen. Abschlussbericht des Bayerischen Klimaforschungsverbundes, Nov. 1999 <<http://www.bayforklim.uni-muenchen.de>>
- EVANS LT (ed.) (1993) Crop evolution, Adaption and Yield. Cambridge University Press
- FANGMEIER A, JÄGER HJ (2001) Wirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen. In: Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie. GUDERIAN R (Hrsg.). Bd. 2A Terrestrische Ökosysteme. Springer, Berlin Heidelberg New York, S. 382-433
- FUHRER J (2003) Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 97: 1-20
- FUHRER J, BOOKER F (2003) Ecological issues of ozone: agricultural issues. *Environ. Int.* 29: 141-154
- GERSTENGRABE FW, BADECK F, HATTERMANN F, KRYSANOVA V, LAHMER W et al. (2003) Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und die Landwirtschaft sowie Ableitung erster Perspektiven. PIK-Report No.83, Potsdam 2003 http://www.pik-potsdam.de/news/brdbg_studie.html

- HARRISON PA, BUTTERFIELD RE, ORR JL (2000) Modelling climate change impacts on wheat, potato and grapevine in Europe. In: DOWNING TE, HARRISON PA, BUTTERFIELD RE, LOSDALE KG (eds.) *Climate Change, Climate Variability and Agriculture in Europe: An Integrated Assessment*. Research Report No. 21, Environmental Change Unit, University of Oxford, Oxford, UK, 367-392
- HULME M, BARROW EM, ARNELL NW, HARRISON PA, JOHNS TC, DOWNING TE (1999) Relative impacts of human-induced climate change and natural climate variability. *Nature* 397: 688-691
- IDSO SB, IDSO KE (2001) Effects of atmospheric CO₂ enrichment on plant constituents related to animal and human health. *Environ. Exp. Bot.* 45: 179-199
- IPCC (2001) In: Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguera M, van der Linden PJ, Xiaosu D (eds.). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, UK
- KANG SZ, ZHANG FC, HU XT, ZHANG, JH (2002) Benefits of CO₂ enrichment on crop plants are modified by soil water status. *Plant Soil* 238: 69-77
- KIMBALL BA, KOBAYASHI K, BINDI M (2002) Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment. *Adv. Agron.* 77: 293-368
- LINCOLN DE, FAJER ED, JOHNSON, RH (1993) Plant insect herbivore interactions in elevated CO₂ environments. *TREE* 8: 64-68
- LONG SP, WOODWARD FI (eds.) (1988) *Plants and Temperature*. Society for Experimental Biology, Cambridge
- LONG SP (1991) Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO₂ concentrations: has its importance been underestimated? *Plant Cell Environ.* 14: 729-739
- LUO Y, MOONEY HA (1999) (eds.) *Carbon Dioxide and Environmental Stress*. Academic Press, San Diego, London, Boston, New York, Sydney, Tokyo, 415 S.
- MANDERSCHIED R, FRÜHAUF C, WEIGEL HJ (2003) Effects of free air CO₂ enrichment (FACE) and soil nitrogen fertilizer on radiation absorption, radiation use efficiency and yield of winter barley. *Proceedings of VII Congress of the European Society for Agronomy, Cordoba/Spain*, 207-208
- MANDERSCHIED R, FRÜHAUF C, WEIGEL HJ (2003) Wechselwirkung von CO₂-Anreicherung unter Feldbedingungen (FACE) und Stickstoffversorgung auf Wachstum und Ertrag von Zuckerrüben. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* Bd. 15: 158-160
- MANNING WJ, VON TIEDEMANN AV (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
- PARRY ML (1990) *Climate Change and World Agriculture*. Earthscan, London

- PARRY ML, ROSENZWEIG C, IGLESIAS A, FISCHER G, LIVERMORE M (1999) Climate change and world food security: a new assessment. *Global Environmental Change* 9: 51-67
- PARRY ML (ed.) (2000) The changing climate of Europe. Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe. The Europe ACACIA Project. Jackson Environment Partner, University of East Anglia, Norwich, UK
- PETIT JR, JOUZEL J, RAYNAUD D, BARKOV NI, BARNOLA JM, BASILE I et al. (1999) Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostoc ice core, Antarctica. *Nature* 399: 429-436
- POLLEY HW (2002) Implications of atmospheric and climatic change for crop yield. *Crop Sci.* 42: 131-140
- POORTER H (1993) Interspecific variation in the growth response of plants to an elevated ambient CO₂ concentration. In: Rozema J, Lambers H, Van de Geijn SC, Cambridge ML (eds.) CO₂ and biosphere. Kluwer Academic Dordrecht, 77-99
- PORTER JR, GWAITH M (1999) Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *Eur. J. Agron.* 10: 23-36.
- PORTER JH, PARRY ML, CARTER TR (1991) The potential effects of climatic change on agricultural insect pests. *Agric. Forest Meteorol.* 57: 221-240
- PATTERSON DT (1995) Weeds in a changing climate. *Weed Sci.* 43: 685-701
- PATTERSON DK, WESTBROCK JK, JOYCE RJV, LINDGREN PD, ROGASIK, R (1999) Weeds, insects and diseases. *Climatic Change* 43: 711-727
- REDDY KR, HODGES HF (eds.) (2000) Climate Change and Global Productivity, CABI Publishing, Wallingford
- REILLY JM (1999) Climate Change and Agriculture: The state of the scientific knowledge. *Climatic Change* 43: 645-650
- ROSENZWEIG C, PARRY ML (1994) Potential impact of climate change on world food supply. *Nature* 367: 133-138
- ROSENZWEIG C, HILLEL D (eds.) (1998) Climate Change and the Global Harvest. Oxford University Press, Oxford, UK
- SCHNEIDER SH, EASTERLING WE, MEARNs LO (2000) Adaptation: sensitivity to natural variability, agent assumptions and dynamic climate changes. *Climate Change* 45: 203-221
- SCHULZE ED, BECK E, MÜLLER-HOHENSTEIN K (Hrs.) (2002) Pflanzenökologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, 846 S.
- WALKER B, STEFFEN W (1996) Global Change and Terrestrial Ecosystems. Cambridge University Press, Cambridge, 619 S.

- WEIGEL HJ (2004) Air Pollutants: Interactions with Elevated Carbon Dioxide. In: Encyclopedia of Plant and Crop Science, Marcel Dekker, New York, 17-19
- WEIGEL HJ, MANDERSCHIED R (2004) CO₂ enrichment effects on forage and grain nitrogen content of pasture and cereal plants. J. Crop Production 13: in press
- WHEELER TR, BATTIS GR, ELLIS RH, HARDLEY P, MORRISON JIL (1996) Growth and yield of winter wheat (*Triticum aestivum*) crops in response to CO₂ and temperature. J. Agric. Sci. 127: 37-48