

Klimawandel – Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten

HANS-JOACHIM WEIGEL¹

¹ Institut für Biodiversität, Johann Heinrich von Thünen-Institut,
Bundesallee 50, 38116 Braunschweig; hans.weigel@vti.bund.de

Zusammenfassung

Bisherige Beobachtungen und Klimamodelle für die Zukunft weisen auf Veränderungen mittlerer Klimawerte (höhere Temperaturen, Verschiebungen von Niederschlagsverhältnissen, Zunahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration) sowie Änderungen in Häufigkeit, Dauer und Stärke von Klimaextremen (Frost-, Hitze- und Trockenperioden, Starkniederschläge, Hagel, Stürme, Hochwasser, Sturmfluten etc.) hin.

Wegen der hohen Vulnerabilität des Agrarsektors sind die möglichen weiteren Auswirkungen dieser Veränderungen auf landwirtschaftliche Kulturpflanzen, auf Agrarökosysteme sowie auf die Agrarproduktion insgesamt von hohem Interesse. Der vorliegende Beitrag beschreibt an ausgewählten Beispielen vorwiegend aus dem Bereich des Ackerbaus Vorstellungen zur Wirkung einzelner Klimaelemente und zu Möglichkeiten der Anpassung.

Die Szenarien zur Klimaentwicklung in Deutschland folgen den globalen Trends. Die zunehmende CO₂-Konzentration in der Atmosphäre soll zu einer Stimulation des Pflanzenwachstums (sog. „CO₂-Düngeeffekt“) verbunden mit einer erhöhten Wassernutzungseffizienz führen. Höhere Durchschnittstemperaturen beschleunigen die Entwicklung vieler Pflanzen und führen speziell bei Getreide damit zu sinkenden Kornerträgen. Getreidearten sind darüber hinaus speziell gegenüber zunehmenden Hitzeperioden empfindlich. Zuneh-

mender Wassermangel bzw. Trockenheitsprobleme werden die am stärksten wachstumshemmende Folge des Klimawandels darstellen.

Inwieweit sich negative und positive Klimawirkungen gegenseitig beeinflussen, ist großenteils noch nicht bekannt, wird aber von entscheidender Bedeutung für die Vorhersage zukünftiger Erntemengen sein. Anpassungsmöglichkeiten der Landwirtschaft sind vielfältig und umfassen Managementmaßnahmen auf der Betriebsebene wie Bodenbearbeitung, Sortenwahl und Fruchtfolgegestaltung.

Ein wesentlicher Anpassungsbeitrag an den Klimawandel wird durch die Pflanzenzüchtung erreicht werden können. Unterschiede zwischen konventioneller und ökologischer Landbewirtschaftung im Hinblick auf die relative Empfindlichkeit gegenüber dem Klimawandel und die Anpassung an den Klimawandel sind noch nicht fundiert zu bewerten.

Einführung

Der Klimawandel betrifft die Natur und Umwelt und alle davon abhängenden Wirtschaftsbereiche bzw. -sektoren.

Insbesondere die Landwirtschaft hängt grundsätzlich und unmittelbar von Witterung und Klima ab und gehört damit zu den sensiblen Sektoren, die von den Klimaveränderungen betroffen sind.

Immer deutlicher wird, dass sich der Klimawandel in den nächsten Jahrzehnten eher noch beschleunigt und nicht mehr

aufzuhalten ist. Die Landwirtschaft und der ländliche Raum insgesamt müssen sich daher diesem Wandel stellen. Die Verletzlichkeit bzw. Vulnerabilität des Agrarsektors insgesamt wird dabei davon abhängen, wie Art und Intensität der Klimaänderung selbst ablaufen, wie stark das jeweils betrachtete System innerhalb des Agrarsektors betroffen sein kann und wie die Fähigkeiten ausgeprägt sind, durch geeignete Maßnahmen Folgen des Klimawandels abzumildern oder zu vermeiden, d.h. sich anzupassen.

Sinnvolle Anpassungen setzen voraus, dass die potentiellen Auswirkungen des Klimawandels z.B. auf Prozesse der Pflanzenproduktion, auf Bodeneigenschaften und auf die Leistungen von Nutztieren sowie auf strukturelle und funktionelle Eigenschaften von Agrarökosystemen (Abb. 1) insgesamt möglichst genau voraussagbar sind.

Der vorliegende Beitrag gibt zunächst einen kurzen Überblick über die Veränderungen des Klimas und bespricht danach anhand von Beispielen gegenwärtige Vorstellungen zur Wirkung des Klimawandels auf einige ausgewählte Teilbereiche der Landwirtschaft (Ackerbau, Boden, Phytopathologie) sowie zu deren Möglichkeiten zur Anpassung. Die Situation der mitteleuropäischen Landwirtschaft steht im Vordergrund.

Klimawandel: Beobachtungen und Zukunftsszenarien

Klima ist charakterisiert durch chemische und physikalische Klimatelemente. Der bisherige bzw. der vorausgesagte zukünftige globale Klimawandel lässt sich durch folgende generellen Trends beschreiben

- (rasch) zunehmende CO₂-

Konzentration

- steigende Durchschnittstemperaturen
- Zunahme von wärmeren, trockeneren Sommern
- Zunahme von wärmeren, feuchteren, schneeärmeren Wintern
- zunehmende Klimavariabilität bzw. – extreme (Hitzeperioden; Sommerdürren; Starkniederschläge etc.)
- steigende troposphärische Ozon-Konzentrationen
- Meeresspiegelanstieg.

Einige dieser Entwicklungen sollen kurz besprochen werden.

Die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre hat sich im Laufe des letzten Jahrhunderts deutlich verändert und wird

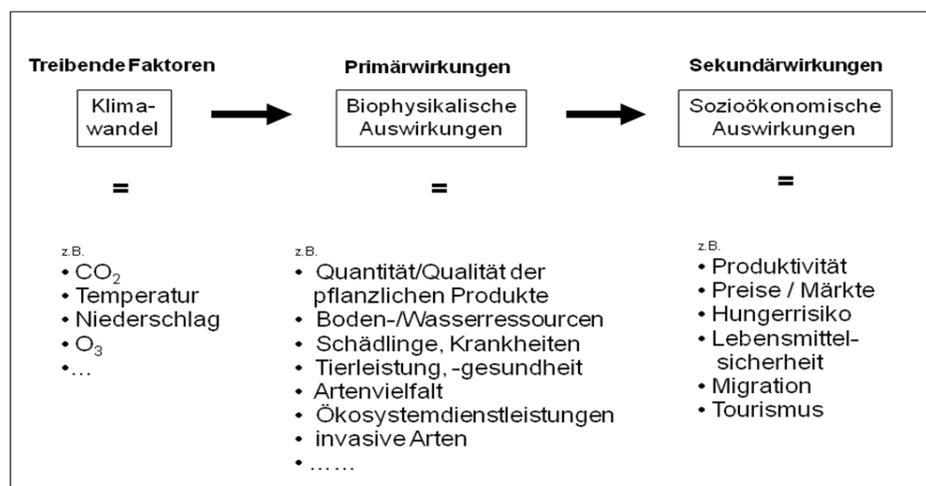


Abbildung 1: Wirkungsebenen des Klimawandels in der Landwirtschaft

sich weiter verändern. Nachweisbar haben die Konzentrationen zahlreicher Spurengase (z.B. Kohlenstoffdioxid CO₂; troposphärisches Ozon O₃; Distickstoffmonoxid / Lachgas N₂O; Stickstoffmonoxid und -dioxid, NO/NO₂; Methan CH₄) in den letzten 100 Jahren stark zugenommen. Neben ihrer Wirkung als „Treibhausgase“ sind Gase wie CO₂, O₃ und NO/NO₂ in die biogeochemischen Kreisläufe eingebunden und wirken direkt auf Vegetation und Landwirtschaft ein, indem sie unmittelbar mit Pflanzen und Böden interagieren. Von besonderer Bedeutung ist das CO₂. CO₂ ist

neben Wasserdampf das wichtigste klima-relevante Spurengas und gleichzeitig als wichtigster Pflanzennährstoff Grundlage allen Lebens. Während die globale CO₂-Konzentration der Atmosphäre über > 400 000 Jahre hinweg bis etwa zum Ende des 19. Jahrhunderts bei ca. 280-290 ppm lag, steigt sie seitdem stark an und beträgt gegenwärtig bereits ca. 385

ppm. Hält der jüngste Trend an, wird die CO₂-Konzentration in nur 50 Jahren global bereits bei Werten zwischen ca. 500–650 ppm liegen. Erhöhte CO₂-Konzentrationen beeinflussen das Pflanzenwachstum in der Regel positiv (s.u.). Trendaussagen zum zukünftigen Verhalten der anderen Spurengasen sind schwieriger. Bodennahe O₃-Konzentrationen, die ein hohes phytotoxisches Potential besitzen, sollen insbesondere in den urban-agroindustriellen Ballungsräumen der Erde mit einer Rate von 0,3 - 1,0% pro Jahr weiter zunehmen. In Deutschland ist ein Trend abnehmender O₃-Spitzenkonzentrationen aber zunehmender Hintergrundkonzentrationen in ländlichen Räumen zu beobachten.

Beobachtungs- bzw. Messdaten zeigen, dass sich die globale Durchschnittstemperatur zwischen ca. 1900-2005 um 0,74° C erhöht hat. Mit der globalen Temperaturerhöhung verbundenen war eine Zunahme der durchschnittlichen globalen Niederschläge. Zwischen 1900-2005 nahmen die Niederschläge dabei nördlich des 30. Breitengrades tendenziell leicht zu, während sie in vor allem in den Tropen besonders seit ca. 1970 leicht abnahmen. Generell variieren die Niederschlagstrends regional und zwischen verschiedenen Zeitabschnitten sehr stark.

Die Entwicklung von Klimawerten in Deutschland ist beispielhaft in Tab. 1 dargestellt. Detaillierte Darstellungen dazu können über den Deutschen Wetterdienst

on-line abgerufen werden (www.dwd.de).

Die Entwicklung der mittleren Temperatur- und Niederschlagswerte in Deutsch-

Tabelle 1: Beobachtete Temperatur- und Niederschlagstrends in Deutschland zwischen 1900-2000 (Temperatur in °C; Niederschlag in %); nach Rapp und Schönwiese 2006, verändert

Klimaelement	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Temperatur 1901-2000	+ 0,8	+ 1,0	+ 1,1	+ 0,8	+ 1,0
1951-2000	+ 1,4	+ 0,9	+ 0,2	+ 1,6	+ 1,0
Niederschlag 1901-2000	+ 13	- 3	+ 9	+ 19	+ 9
1951-2000	+ 14	- 16	+ 18	+ 19	+ 6

land lässt sich folgendermaßen beschreiben. Die Durchschnittstemperatur zeigt seit ca. 1900 eine Zunahme von ca. 0,9°C, wobei dieser Anstieg im Sommer stärker als im Winter ausgeprägt war und in den südwestlichen und westlichen Bundesländern stärker verlief als im Nordosten. Im entsprechenden Zeitraum hat die jährliche Durchschnittsniederschlagsmenge zwar leicht zugenommen, die Entwicklung zeigt dabei aber für die Sommermonate deutschlandweit eine Abnahme, allerdings mit einer starken räumlichen Differenzierung. Grundsätzlich haben die Sommerniederschläge im Nordosten und Südwesten deutlich abgenommen (bis -14%), im Nordwesten und in Bayern dagegen leicht zugenommen (bis + 5,5%). Dagegen haben die Winterniederschläge deutschlandweit deutlich zugenommen (im Mittel ca. +20%).

Parallel zum Nachweis des Klimawandels durch physikalische Messwerte liegen biologische Indikatoren des Klimawandels vor. Im Laufe des letzten Jahrhunderts ist neben der Verlängerung der Vegetationsperiode die Vorverlegung phänologischer Phasen, insbesondere der Frühjahrsindikatoren zu beobachten. So hat sich in Europa zwischen 1971 und 2000 der Beginn der Vegetationsperiode durchschnittlich ca. 7,5 Tage verfrüht bzw. die Vegetationsperiode um ca. 10 Tage verlängert.

Im Vergleich zum Kenntnisstand der Veränderungen mittlerer Klimawerte ist das Wissen um die Veränderungen der Klimavariabilität und von Extremwerten gerin-

ger. Die Entwicklung der letzten Jahrzehnte zeigt u.a. eine Abnahme der Anzahl der Frosttage und eine Zunahme der Andauer von Hitzewellen, d.h. die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Hitzetagen mit Temperaturen von mehr als 30°C oder von Dürreperioden hat sich in den letzten Jahrzehnten erhöht. Speziell im Süden Deutschlands treten geringere monatliche Niederschlagsmengen häufiger auf, während ein häufigeres Auftreten hoher monatlicher Niederschlagsmengen im Westen

50-100 Jahre. Die Projektionen basieren auf unterschiedlichen Emissionsszenarien klimawirksamer Spurengase, die wiederum von der zukünftigen wirtschaftlichen Gesamtentwicklung der unterschiedlichen Gesellschaften der Erde abhängen. Entscheidend ist ferner, welches Emissionsszenario angewandt wird. Beispielsweise wird für das mittlere Emissionsszenario A1B, das in vielen Zukunftsszenarien zugrunde gelegt wird, angenommen, dass die Emissionen von Treibhausgasen bis Mitte

Tabelle 2: Zusammenfassende Darstellung von Klimaszenarien für Deutschland auf der Basis vier verschiedener regionaler Klimamodelle; dargestellt sind die Veränderungen der Klimawerte (Temperatur in °C; Niederschlag in %) für zwei zukünftige Zeitfenster im Vergleich zu einem Referenzzeitraum 1971-2000; Emissionsszenarium A1B; eigene Zusammenstellung nach DWD 2009

Regionalmodell →		REMO	CLM	STAR	WETTREG	Bemerkung
Temperatur Sommer	2050	+ 2,0 ⁰			< + 1,0 ⁰	bes. Süd-West-D
	2100	+ 5,0 ⁰			< + 2,5 ⁰	
Temperatur Winter	2050	+ 1,0 ⁰ ... + 2,0 ⁰				Ost- u. Süd-D > Nord- u. West-D
	2100	+ 2,0 ⁰ ... + 5,0 ⁰				
Niederschlag Sommer	2050	- 15%		- 25%	- 15%	REMO z.T. Zunahme
	2100	- 25% ... - 40%				
Niederschlag Winter	2050	Zunahme-Trend; lokal Abnahme			... + 25%	
	2100	+ 25%		---	... + 70%	
Sommertage	2050	+ 12 ... + 30 Tage				bes. Süd-West-D
	2100	+ 30 ... + 42 Tage				
heiße Tage	2050	+ 3 ... + 12 Tage				bes. Süd-West-D; Nord-D gering
	2100	+ 10 ... + 40 Tage				

und ein selteneres Auftreten hoher monatlicher Niederschlagsmengen im Osten zu beobachten ist. Dies ist verbunden mit Trends zu höheren monatlichen und saisonalen Niederschlagssummen sowie zu gesteigerter Niederschlagsvariabilität im Winter und zu verringerter monatlicher und saisonaler Variabilität der Niederschlagsmengen im Sommer.

Aussagen zu Änderungen des zukünftigen Klimas werden mittels Klimamodellen bzw. -szenarien getroffen und beziehen sich meist auf den Zeitraum der nächsten

des laufenden Jahrhunderts zunächst weiter ansteigen und danach zurückgehen. Die auf diesen Emissionsszenarien basierenden sogenannten Globalen Zirkulationsmodelle (GCM) bilden die Klimaveränderungen nur mit sehr großer räumlicher Auflösung ab und sind für regionale Fragestellungen nur sehr eingeschränkt geeignet. Für kleinräumige Klimaszenarien sind daher mittlerweile verschiedene Regionalmodelle (sog. down scaling) entwickelt und eingesetzt worden. In Deutschland werden zurzeit die Modelle

WETTREG und STAR, die auf statistischen Verfahren beruhen, und die deterministischen Vorhersagemodelle REMO und CLM, die auf den numerischen Wettervorhersagemodellen des DWD beruhen, verwendet. Alle Modelle werden vom globalen Klimamodell ECHAM 5 des Max Planck-Institutes (MPI) in Hamburg angetrieben. Tab. 2 fasst wesentliche Aussagen dieser Regionalmodelle für Deutschland zusammen. Detaillierte Aussagen zu diesen regionalen Klimaszenarien in Form von

Kartendarstellungen finden sich auf der Internetseite des DWD (www.dwd.de). Zwischen den Regionalmodellen bestehen durchaus Unterschiede in den Projektionen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, mehrere Regionalmodelle für die Klimafolgenabschätzung einzusetzen.

Beispielsweise wird bis ca. 2021-2050 im Vergleich zum modellspezifischen Kontrollzeitraum 1961-1990 je nach Modell mit einem deutschlandweiten Anstieg der Jahresmitteltemperatur um $0,5^{\circ}\text{C}$ bis max. $2,3^{\circ}\text{C}$ gerechnet. Für den Zeitraum bis 2071-2100 soll dieser Anstieg zwischen $2,0^{\circ}\text{C}$ bis $4,0^{\circ}\text{C}$ liegen. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge soll bis 2021-2050 je nach Modell und Region deutschlandweit um bis zu 15% abnehmen, wobei dies besonders auf die östlichen und südlichen Landesteile zutreffen soll. Für den Sommer zeigen alle der o.g. Modelle in guter Übereinstimmung eine deutschlandweite Abnahme der Niederschlagsmenge zwischen ca. 5% - 25%. Für den Zeitraum 2071-2100 wird dagegen unabhängig vom Modell deutschlandweit keine wesentliche Änderung der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge vorausgesagt, jedoch eine deutliche Abnahme der Niederschlagsmengen im Sommer um bis zu 40%. Besonders betroffen sein können dabei die südwestlichen und Teile von Regionen der nordöstlichen Bundesländer. Dagegen werden erhebliche Zunahmen (+ 5% bis +25%) der Niederschlagsmengen im Winter vorausgesagt.

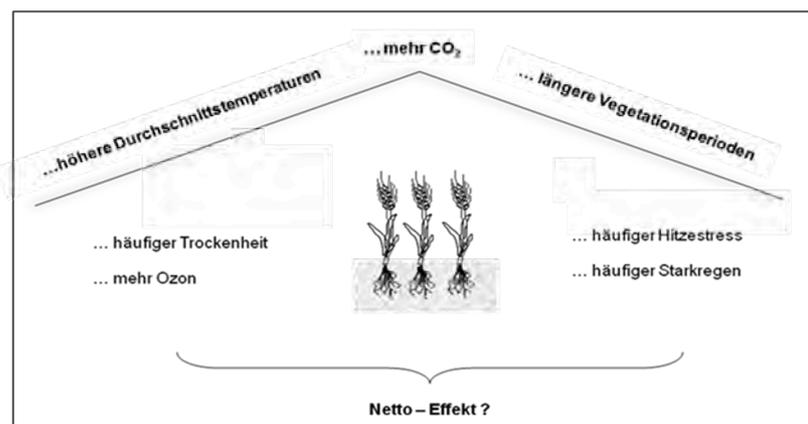
Die Ableitung von Szenarien über das zukünftige Auftreten von Klimaextremen (Frost-, Hitze- und Trockenperioden, Starkniederschläge, Hagel, Stürme, Hochwasser und Sturmfluten) ist schwierig. Grundsätzlich wird von einer generellen Tendenz zur weiteren Zunahme von extremen Klimaereignissen (z.B. Hitzeperioden, Sommertrockenheit) ausge-

gangen. Tab. 2 zeigt z.B., dass alle vier Regionalmodelle für Deutschland eine starke Zunahme vom Sommertagen (Tage mit Mittagtemperaturen $> 25^{\circ}\text{C}$) und heißen Tagen (Tage mit Mittagtemperaturen $> 30^{\circ}\text{C}$) abbilden.

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 daher als solche eher von den Betroffenen wahrgenommen.

Zusammengefasst bedeutet die oben skizzierte Entwicklung, dass die Agrarökosysteme der Zukunft mit einem Durchschnittsklima konfrontiert sind, das mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit wärmer ist, das dadurch längere Vegetationsperioden ermöglicht und das ein in der jüngeren Erdgeschichte einmalig hohes CO_2 -Angebot der Atmosphäre für alle Pflanzen bereitstellt. Vor dem Hintergrund dieser neuen klimatischen Durchschnittsbedingungen ist zusätzlich mit einer höheren Variabilität einzelner Witterungs- bzw.

Abbildung 2: Agrarökosysteme im Klima der Zukunft



Wetterereignisse zu rechnen, d.h. mit dem Auftreten von räumlich und zeitlich stark variierenden Perioden extremer Ereignisse wie Hitze, Trockenheit, Ozonperioden, Starkniederschläge etc. (Abb. 2). Die interaktiven Auswirkungen dieser verschiedenen Faktoren für die Agrarproduktion zu erkennen und daraus Konsequenzen zur

Anpassung abzuleiten, bleibt eine Herausforderung.

Tabelle 3: Zusammenstellung von Ergebnisbeispielen zu relativen Änderungen im Kornertrag wichtiger Kulturpflanzen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen (ca. 550-700 ppm) im Vergleich zum Ertrag bei heutigen CO₂-Konzentrationen (370-385 ppm) ermittelt unter verschiedenen Versuchsbedingungen

Pflanze	Ertragsänderung durch erhöhte CO ₂ -Konzentrationen in %			
	Bereich	Mittelwert Kammerversuche	Mittelwert FACE	Zahl der Studien
Weizen	- 20 bis + 80	+ 10	+ 7	50
Soja	- 20 bis + 100	+ 24	+ 15	58
Reis	+ 4 bis + 71	+ 15	+ 12	6
Mais	- 35 bis + 93	+ 29	~ 0	57
Hirse	- 4 bis + 31	+ 31	+ 6	2

Auswirkungen einzelner Klimatelemente auf Kulturpflanzen, Böden und auf phytosanitäre Zusammenhänge

Auswirkungen auf Kulturpflanzen

CO₂ aus der Atmosphäre ist als Substrat für Wachstum und Entwicklung aller Pflanzen von fundamentaler Bedeutung. Da die heutige CO₂-Konzentration der Atmosphäre für die meisten C3-Pflanzen suboptimal ist, führt eine Erhöhung der atmosphärischen CO₂-Konzentration bei fast allen C3-Pflanzen zu einer Stimulation der Photosyntheserate und gleichzeitig zu einer Verminderung der stomatären Leitfähigkeit bzw. der Transpiration. Zur Abschätzung der Auswirkungen des zukünftigen Klimawandels ist es notwendig zu wissen, ob diese Photosynthese- bzw. Transpirationsbeeinflussung zu einer Steigerung des Wachstums und des Ertrages von Kulturpflanzen durch mehr CO₂ führen könnten.

Mittlerweile ist dazu eine erhebliche Zahl von Untersuchungen durchgeführt worden, um die mögliche Größe des sog. „CO₂-Düngeeffektes“ zu ermitteln. Die Mehrzahl der dazu durchgeführten Experimente fand unter mehr oder weniger artifiziellen Umwelt- (z.B. Klimakammern, Gewächshäuser, Feldkammern) bzw. Wachstumsbedingungen (z.B. Topfversuche, optimierte Wasser- und Nährstoffversorgung) statt. Diese Untersuchungen erbrachten meist relativ hohe Ertragszuwächse (Tab. 3) im Bereich von + 25% bis + 30% bei einer CO₂-Erhöhung um 250-300 ppm gegen-

über der jeweils aktuellen Umgebungskonzentration (350-385 ppm). Jüngere Versuchsanstellungen mit Weizen, Reis, Soja, Gerste und Zuckerrübe unter realen Feldbedingungen mit der sog. Free Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE)-Technik deuten allerdings auf geringere (+ 10% bis + 14%) Wachstumsstimulationen hin. Dies beruht möglicherweise

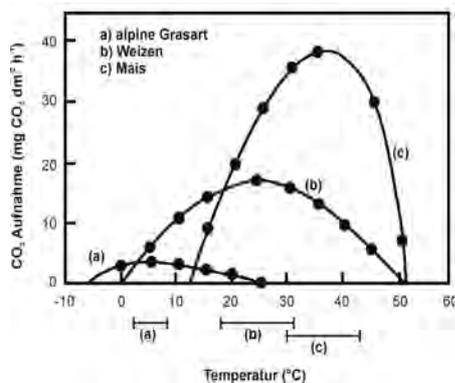
auf vielseitigen Wechselwirkungen der CO₂-Konzentration mit anderen Faktoren (z.B. Temperatur, Strahlung, Wasserversorgung) sowie auf Rückkoppelungsmechanismen innerhalb der Pflanze unter FACE-Bedingungen (s.u.).

Experimentelle Untersuchungen und Modelle haben gezeigt, dass die Evapotranspiration bzw. die Wasserabgabe von Kulturpflanzen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen abnehmen könnten. Bei gleichzeitig stimuliertem Wachstum ist dies gekoppelt mit einer Steigerung der Wasserausnutzungseffizienz. In Pflanzenbeständen, die unter erhöhten CO₂-Konzentrationen wachsen, lassen sich zudem häufig erhöhte Bodenfeuchten feststellen. Zusammen deutet dies darauf hin, dass positive Wachstumseffekte infolge der Zunahme der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auch indirekt über eine verbesserte Wasserversorgung möglich sind. Dieser Effekt ist für C3- und C4-Pflanzen wie Mais gleichermaßen relevant.

Eine in fast allen Studien zum „CO₂-Düngeeffekt“ beobachtete Reaktion ist die Veränderung der Gehalte an Makro- und Mikroelementen sowie sonstiger Inhaltsstoffe (z.B. Zucker, Vitamine, sekundäre Pflanzenstoffe). Diverse CO₂-Experimente ergaben eine Reduktion des Stickstoffgehaltes in Blattorganen (z.B. Grünlandarten) und in Früchten (z.B. Getreidekörner) in der Größenordnung zwischen 10% - 15% im Vergleich zur heutigen CO₂-Konzentration. Eine derartige Änderung in

der Zusammensetzung des pflanzlichen Gewebes kann über den Gesichtspunkt der Nahrungs- und Futtermittelqualität hinaus Konsequenzen für agrarökologische Zusammenhänge haben: die Veränderungen

Abbildung 3: Die Temperaturabhängigkeit der Photosyntheseleistung verschiedener Kulturpflanzen



der pflanzlichen Inhaltsstoffe kann zu Veränderungen der Nahrungsquelle für herbivore Insekten (s.u.) bzw. für sonstige Schaderreger führen und aufgrund z.B. des erweiterten C-/N-Verhältnisses der pflanzlichen Rückstände kann sich der Streuabbau bzw. die Mineralisierung im Boden verzögern.

Stoffwechsel und Wachstum von Pflanzen sind durch Kardinaltemperaturen (Minimum, Optimum, Maximum) gekennzeichnet, die je nach Pflanzenart oder -sorte bzw. je nach Standort und Herkunft sehr unterschiedlich ausgeprägt sind (Abb. 3). Steigende Durchschnittstemperaturen und zunehmend auftretende Extremtemperaturereignisse (Hitzestress) werden sich daher unterschiedlich auf die Pflanzenproduktion auswirken.

Positive Effekte auf Photosynthese und Wachstum durch eine moderat gleichmäßige Erwärmung werden dort auftreten, wo die gegenwärtige Temperatur wachstums-limitierend ist. Bei Getreidearten, wie z.B. Weizen, fällt die Photosynthese zwar nach einem relativ breiten Temperaturoptimum ab einer Temperatur von ca. > 25°C ab, aber ihre relative Temperatursensitivität ist wesentlich geringer als die einiger anderer spezifischer Wachstumsprozesse. Höhere Temperaturen beschleunigen gleichzeitig

die Dunkelatmung bzw. die Photorespiration, über die 40- 50% des assimilierten Kohlenstoffes wieder verloren gehen können. Dies führt zur Verringerung des Bilanzüberschusses aus Photosynthese und Atmung und damit zu verminderten Wuchsleistungen.

Wärmere Durchschnittstemperaturen werden insbesondere die Entwicklungsphasen von Kulturpflanzen beeinflussen, wobei die jeweiligen Entwicklungsstadien (Keimung, Blütenbildung und -entwicklung, Reife, Dormanz, Vernalisation, Blattentfaltung) unterschiedlich betroffen sind. 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. Allerdings könnten Schäden in Folge einer erhöhten Spätfrostgefährdung und verringerten Winterhärte zunehmen.

Getreidearten (z.B. Weizen, Gerste) und Körnerleguminosen, die durch festgelegte Reife- bzw. Entwicklungsstadien gekennzeichnet sind, reagieren auf eine temperaturbedingte Entwicklungsbeschleunigung eher negativ, da hier die Entwicklung durch Wärmesummen bestimmt wird. Wärmere Temperaturen beschleunigen damit die Entwicklung und reduzieren in der Regel das Ertragspotential. Eine durchschnittliche Temperaturerhöhung von z.B. 1°C kann in einer Verkürzung der Kornfüllungsphase um 5% resultieren und damit einen Ertragsverlust von ca. 10% verursachen. Diese Zusammenhänge spiegeln sich u.a. in dem Nord-Südgefälle von Weizen-erträgen in Europa wider. Die Verkürzung der Kornwachstumsdauer wird als ein entscheidender Faktor für die Ertragsminderungen bei zukünftiger Erwärmung über einen Anstieg der mittleren Wachstumstemperaturen angesehen.

Eine direkte Folge der Erwärmung ist neben der Verlängerung der Vegetationsperiode die Vorverlegung phänologischer Phasen (s.o.). Kulturen wie Apfel, Kirsche und Roggen zeigen den Trend mit einer Ver-

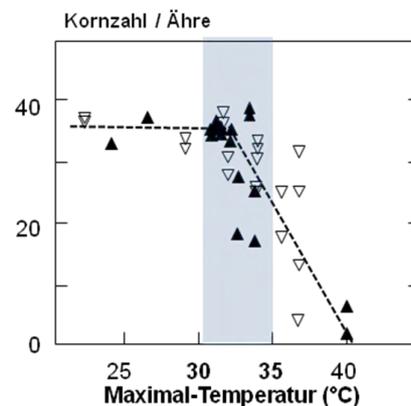
früherung der Frühjahrsentwicklung um 2 bis 3 Tage pro Dekade. Mit einher geht eine Arealverschiebung bzw. -erweiterung von bisher wärmelimitierten Arten. Arten wie Kartoffel, Zuckerrübe, bzw. Grünlandarten, die so lange wachsen, wie die Temperatur dazu ausreicht, werden positiv auf steigende Durchschnittstemperaturen reagieren, sofern nicht andere Ressourcen (z.B. Wasserversorgung) limitierend sind. Auch in Zukunft wird sich die Vegetationsperiode als unmittelbare Folge der Erwärmung weiter verlängern: dabei soll in Europa eine Erwärmung um 10°C voraussichtlich zu einer Verfrüherung des Vegetationsbeginns um ca. eine weitere Woche führen. Allerdings werden die Pflanzenentwicklung und insbesondere kritische ontogenetische Phasen, wie z.B. der Blühbeginn, in den gemäßigten und kühlen Klimaten neben der Temperatur in starkem Ausmaß auch von der Photoperiodizität gesteuert. Diese verhindert u.a., dass warme Temperaturen zu Jahresbeginn eine riskante Pflanzenentwicklung induzieren.

Führt eine Temperaturerhöhung zur Aufhebung der Temperaturlimitierung des Wachstums, sind Verschiebungen in den Anbaugebieten zu mehr nördlichen Breitengraden (pro Grad Temperaturerhöhung ca. 100-150 km nordwärts) und zu größeren Höhenlagen (pro Grad Temperaturerhöhung ca. 100 m) zu erwarten. Dies bedeutet z.B. für Europa bzw. Deutschland eine weitere Verschiebung der Anbaumöglichkeiten für Sommergetreide und Körnermais nach Norden. In Bergregionen (z.B. alpine Gebiete) kann sich der Rauhfutteranbau in höhere Lagen verschieben, zumal auch die Vegetationsperiode früher beginnt und länger andauert. Grundsätzlich werden sich die Anbaumöglichkeiten für Wärme liebende Kulturpflanzenarten bzw. -sorten (z.B. Mais, Soja, Hirse) verbessern. Oberhalb des art- bzw. sortenspezifischen Temperaturoptimums (Abb. 3) werden Kulturpflanzen durch Temperaturextreme jedoch meist geschädigt. Besonders Phasen der Samen- und Fruchtbildung z.B. sind relativ temperaturempfindlich. Extremtemperaturen (z.B. Hitzeperioden in

heißen Sommermonaten), die nur wenig oberhalb der Durchschnittstemperaturen liegen, beeinträchtigen generative Stadien, wie z.B. die Anthese, d.h. das Entfalten der Blüte bei Getreide. Hier können hohe Temperaturen (für Weizen, Mais oder Reis ab $T > 30^\circ$ bzw. 35°C) zu Problemen bei der Befruchtung bis hin zur Sterilität führen, was bei Getreide durch die Verringerung der potentiellen Kornzahl deutliche Ertragseinbußen nach sich zieht (Abb. 4). Auch bei anderen sensitiven Kulturen, wie z.B. Tomaten, können Blüten oder junge Früchte auf Grund von Hitzestress absterben. Hitze als Stressfaktor für Kulturpflanzen wird damit an Bedeutung gewinnen.

Kritisch für den Ackerbau ist die generelle

Abbildung 4: Beziehung zwischen der Kornzahl pro Ähre und der maximalen halbstündigen Temperatur in den letzten 5 Tagen vor der Anthese; CO₂-Konzentration: offen = 380 ppm; gefüllt = 700 ppm. (n. Wheeler et al. 1996; verändert)



Zunahme der Klimavariabilität. Hierzu sind bisher allerdings kaum Szenarien der möglichen Folgewirkungen entwickelt worden. Eine Modellrechnung für Weizen ergab z.B., dass eine simulierte Verdoppelung der Standardabweichung der saisonalen Durchschnittstemperatur unter gleichzeitiger Beibehaltung des Mittelwertes den gleichen Ertragsrückgang bewirken kann wie eine durchschnittliche Temperaturerhöhung um 4°C und gleichzeitig die Variabilität der Erträge verdoppelt.

Qualitätseigenschaften pflanzlicher Produkte können ebenfalls von den Temperaturveränderungen betroffen sein. Hitzestress führt bei Weizen während der Korn-

fällung z.B. zu einer Erhöhung und qualitativen Veränderung des Proteingehalts und beeinflusst funktionelle Eigenschaften für das Brotbacken. In Deutschland wurde z.B. im Jahr 2006 nach den heißen Sommermonaten beobachtet, dass sich der Proteingehalt im Weizen erhöht hatte. Zuckerrüben weisen unter Hitzestress erhöhte Amino-N-Gehalte auf, was sich einerseits positiv auf den Rübenantrag auswirkt, andererseits aber die Zuckerkristallisation behindert. Bei Raps reduzieren hohe Temperaturen den Ölgehalt, was sich z.B. für die Verwendung als Biodiesel negativ auswirkt, während der gleichzeitig zunehmende Proteingehalt aus Sicht der Tierernährung Vorteile hat.

Sofern keine Beeinflussung durch Grundwasser vorliegt, setzt sich der Wasserhaushalt eines Gebietes v.a. aus der Niederschlagsmenge und -verteilung, dem Abfluss und der Verdunstung zusammen. Im Hinblick auf den Klimawandel ist wichtig, dass innerhalb einer relativ weiten Temperaturspanne grundsätzlich der Niederschlag bzw. der Wasserhaushalt bestimmt, welche Kulturpflanzen erfolgreich angebaut werden kann. Selbst geringe Veränderungen der Niederschlagsmengen wirken sich deutlich auf die Produktivität landwirtschaftlich genutzter Ökosysteme aus. Da insbesondere die Verdunstung von der Temperatur abhängt und um ca. 5% pro °C Temperaturerhöhung steigt, wird der Wasserhaushalt eines Agrarökosystems auch durch die klimatische Erwärmung beeinflusst.

Wassermangel kann (i) dauerhaft auftreten, d.h. die Wasserversorgung ist derart eingeschränkt, dass Pflanzenbau nur sehr eingeschränkt bzw. nur mit speziellen Kulturen möglich ist, (ii) er kann in der Vegetationsperiode periodisch regelmäßig auftreten (z.B. Frühjahrstrockenheit in Teilen Europas) und (iii) er kann periodisch unregelmäßig auftreten. Nach einer Definition des DWD entsteht Wasserstress (oder Trockenstress) bei Pflanzen, wenn über längere Zeit eine optimale Evapotranspiration durch Wassermangel nicht mehr möglich

ist. Trockenstress kann sich schnell etablieren oder er kann sich langsam graduell aufbauen, wobei eine gewisse Anpassungsreaktion der Pflanzen möglich ist. Das Reaktionsgeschehen der meisten Pflanzen auf Wassermangel läuft je nach Ausmaß der Verknappung grob vereinfacht über zwei Mechanismen ab: zunächst über eine Reduktion der CO₂ Versorgung bzw. der Photosyntheseleistung durch Stomataverschluss, die zu einer (latenten) Wachstumsinderung führen kann und bei stärkerer Dehydrierung durch Enzym- und Membranschädigungen, in deren Folge die Pflanzen irreversibel geschädigt werden.

Mit abnehmender Verfügbarkeit des Bodenwassers wird die Wasseraufnahme durch die Wurzel eingeschränkt, was daher in der Folge unmittelbar das Pflanzenwachstum beeinträchtigt bzw. reduziert. Davon kann zunächst das oberirdische Sproßwachstum stärker betroffen sein als die Wurzelentwicklung selbst. Verschiedene Arten und verschiedene Sorten einer Art reagieren sehr unterschiedlich auf Wassermangel. Darüber hinaus sind bei vielen Kulturpflanzen unterschiedliche Entwicklungsstadien unterschiedlich empfindlich gegenüber Wassermangel. Nutzpflanzen sind besonders im Stadium der Fortpflanzung (bei Getreide: Blüte, Bestäubung, Kornfüllung) empfindlich gegenüber Wassermangel.

Sensitiv reagiert u.a. auch die Blattentwicklung, so dass sich auch temporär begrenzter Wasserstress durch die Reduktion des Blattflächenindex nachhaltig auf die Photosynthese- und Ertragsleistung auswirken kann. Insbesondere bei einjährigen Kulturpflanzen verkürzt eine zunehmende Sommertrockenheit die effektive Entwicklungsdauer, wobei eine beschleunigte Abreife der Pflanzen in der Regel nicht nur auf Kosten der Fruchtbildung, sondern auch der Produktqualität geht. Tritt eine zunehmende Trockenheit bereits zu Vegetationsbeginn auf, kann sich in Abhängigkeit vom Bodentyp auch das Keimen bzw. Aufgehen von Ackerkulturen verringern. Darüber hinaus sind Nährstoffe bei gerin-

ger Bodenfeuchte schlechter verfügbar und die Anfälligkeit gegenüber Winderosion nimmt zu (s.u.).

Auswirkungen auf Bodenressourcen

Eigenschaften landwirtschaftlicher Böden werden grundsätzlich durch die landwirtschaftliche Bodenbewirtschaftung selbst stark beeinflusst. Vor diesem Hintergrund sind Einflüsse des Klimawandels auf strukturelle und funktionelle Bodeneigenschaften zu bewerten. Zur möglichen Beeinflussung von Böden durch den Klimawandel liegt eine sehr umfangreiche Fachliteratur vor, sodass hier nur einige Beispiele angesprochen werden können, die in Tab. 4 stichwortartig zusammengefasst sind.

Im Vordergrund von Szenarien zu einer möglichen Wirkung der weiter zunehmenden atmosphärischen CO₂-Konzentration stehen mögliche indirekte Wirkungen über die veränderte Qualität und Quantität des zugeführten Pflanzen- bzw. Wurzelmaterials sowie über Veränderungen im Bodenwasserhaushalt (s.o). Neben positiven Auswirkungen einer erhöhten Rhizodeposition von löslichen Kohlenstoffverbindungen auf die Bodenstruktur, sind wiederholt positive Effekte einer CO₂-Anreicherung z.B. auf Mykorrhiza-Pilze und Stickstoff-fixierende Bodenbakterien nachgewiesen worden. Stickstoff-fixierende Pflanzenarten (z.B. Leguminosen) werden häufig durch mehr CO₂ gefördert, was insbesondere im Grünland bzw. im Futterbau von Bedeutung sein könnte. Unter erhöhten CO₂-Bedingungen kann die Bodenatmung deutlich erhöht sein, wobei die Stickstoff-Verfügbarkeit im Boden eine Schlüsselrolle spielt. Bei ausreichender Stickstoff-Versorgung werden höhere Einträge organischer Substanz durch gesteigertes Pflanzenwachstum auch vermehrt abgebaut und es kann zu einem Verlust von Bodenkohlenstoff kommen. Bei limitierter Stickstoff-Verfügbarkeit kommt es dagegen zu einer Immobilisierung von Nährstoffen in der mikrobiellen Biomasse und es kann zu einer Akkumulation von Kohlenstoff im Boden kommen. Da bei zunehmender

CO₂-Konzentration in der Atmosphäre insbesondere die Stickstoff-Konzentrationen im Pflanzenmaterial sinken, ist eine zunehmende Stickstoff-Limitierung der Pflanzenproduktion möglich, sofern nicht durch den vermehrten Anbau von Leguminosen bzw. Düngergaben gegengesteuert wird.

Umsetzungsprozesse im Boden werden im Allgemeinen durch steigende Temperaturen stimuliert. Für physiologisch gesteuerte Reaktionen gilt dies einschränkend innerhalb des spezifischen Toleranzbereiches der jeweiligen Bodenfauna und -flora bzw. der Wurzeln. Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Vertreter der verschiedenen trophischen Ebenen der Nahrungskette im Boden sind z.B. erst in Ansätzen verstanden: bei insgesamt relativ weitem Temperaturoptimum ist nicht zuletzt auf Grund der hohen Biodiversität der Bodenorganismen davon auszugehen, dass diese Ebenen unterschiedlich auf die Klimaerwärmung reagieren.

Eine Erhöhung der Bodentemperatur betrifft im Zusammenspiel mit der Bodenfeuchte v.a. die Bodenatmung bzw. generell mikrobielle Umsetzungsprozesse sowie die Nachlieferung von Mineralstoffen aus Verwitterungsprozessen bzw. die Oberflächeneigenschaften der Tonmineralfraktion. Eine ausreichende Bodenfeuchte vorausgesetzt, ist bei einer Temperaturzunahme voraussichtlich mit einer beschleunigten Mobilisierung von bodenbürtigem Kohlenstoff durch mikrobielle Prozesse zu rechnen; bei einer Limitierung durch Trockenheit kann aber auch der umgekehrte Effekt eintreten. Einige Berechnungen prognostizieren einen Rückgang des Bodenkohlenstoffes bis 2100 in Europa bzw. weltweit von 20-80% aufgrund der Klimaerwärmung. Dagegen legt die Verlängerung der Vegetationsperiode sowie die Wirkung der zunehmenden CO₂-Konzentration auf die pflanzliche Biomasse wiederum eine höhere Kohlenstoff-Sequestrierung in Böden nahe.

Mildere (feuchtere) Winter mit weniger Schneebedeckung und häufigem Wechsel von Frieren und Tauen sollen in Zukunft

zu einer erhöhten Stickstoff-Mineralisation in einer Zeit geringen pflanzlichen Bedarfs führen und könnten damit zu einer erhöh-

die Aktivität der Bodenfauna und -flora, sondern auch auf die Bodenstruktur auswirkt. Kommt es dann im Anschluss zu

Tabelle 4: Übersicht zu möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Bodeneigenschaften; kursiv: positive Auswirkungen bzw. Zunahmen; nicht kursiv: negative Auswirkungen bzw. Abnahmen (nach Rogasik et al. 1998, verändert).

Eigenschaft / Prozess	Erhöhte CO ₂ Konzentration	erhöhte Temperatur	Trockenheit	extreme Niederschläge
biologische Aktivität	<i>höherer C-Input (Wurzel- u. Ernterückstände → Aktivität des Bodenlebens</i>	<i>Bodenbiologie allgemein; Beschleunigung der Stoffumsätze; Respiration > Photosyntheseleistung → Verlust an C_{org}</i>	Bodenbiologie allgemein; Stoffumsetzungsprozesse	Biologische Aktivität (häufigkeitsabhängig)
organische Substanz	<i>C-Input → höherer Gehalt an C_{org}; Veränderung der Humusqualität</i>	Ertragsrückgänge, Rückgang Ernte- und Wurzelrückständen → abnehmende Humusgehalte	<i>C-Akkumulation möglich</i>	Erodierbarkeit; Verschlechterung der Humusqualität
Bodenstruktur	<i>Anzahl stabiler Bioporen (Regenwurmröhren, Wurzelgänge); Bearbeitbarkeit</i>	Verdichtungsgefährdung durch Verlust an org. Bodensubstanz	<i>red. Verdichtungsrisiko; Schrumpfung, Risse, geringere Porosität</i>	Neigung zu Verschlammung und Verdichtung; reduzierte Bearbeitbarkeit
Boden- und Gebietswasserbilanz	<i>Wassernutzungseffizienz; Wasserverbrauch fällt; größere Biomasseproduktion kann positive Effekte kompensieren</i>	Evaporation; Speicherung von pflanzenverfügbarem Bodenwasser infolge Humusverlustes; nutzbare Grundwasservorräte	reduzierter Bodenwassergehalt	zeitweiser Überschuss an Bodenwasser (Auswaschungsgefährdung)
Nährstoffstatus	<i>Nährstoffmobilisierung; Nährstoffvorräte infolge erhöhter Biomasseproduktion</i>	<i>Nährstoffverfügbarkeit (kurzfristig), Pufferkapazität, Redoxpotential; Nährstoffdynamik durch Humusabbau</i>	Nährstoffverfügbarkeit; Düngeneffizienz	Verlagerung von Nährstoffen
Erosion / Infiltration	<i>Oberflächenabfluss und Erodibilität infolge höherer Biomasseproduktion und besserer Bodenbedeckung</i>	Oberflächenabfluss, Infiltration, Erodierbarkeit durch Wasser/ Wind wegen Humusverlust u. verminderter Pflanzenbedeckung	Erodierbarkeit durch Wind	Erosionsschäden und erhöhter Oberflächenabfluss; Minderung der Niederschlagsinfiltration
Nährstoffauswaschung	<i>geringerer Nährstoffverlust bei höheren Entzügen bzw. besserer Sorptionskapazität</i>	N-Mineralisierung → N-Verluste	<i>minimale Nährstoffverluste; Nitrat im Sickerwasser</i>	Verarmung an Nährstoffen durch Oberflächenabtrag und Nährstoffaustrag
Produktionspotential	<i>Zunahme des Ertragspotentials auch auf weniger fruchtbaren Böden möglich</i>	bei zunehmender Sommer-trockenheit bzw. dem vermehrten Auftreten von Extremereignissen → vermindertes Ertragspotential auch auf fruchtbaren Böden		

ten Nitratbelastung von Ökosystemen und Grundwasser beitragen. Die Abnahme von Bodenfrost könnte außerdem die Erosionsgefahr erhöhen. Zunehmende Wärme und insbesondere sommerliche Dürreperioden lassen die Böden dagegen häufiger austrocknen, was sich nicht nur negativ auf

einem Starkregenereignis, ist sowohl mit erhöhten Erosionsschäden zu rechnen als auch mit einem erhöhtem Kontaminationsrisiko für Grund- und Oberflächenwasser durch Schadstoffe und Nährstoffausträge. Gegenüber der heutigen Situation trockenere Böden stellen einen positiven Rück-

kopplungseffekt der Klimaerwärmung dar, da sich nicht nur der Boden, sondern auch die Umgebungsluft bei fehlender Verdunstungskühle stärker erhitzt. Andererseits kann eine Erhöhung der Bodentemperatur die Nährstoffaufnahme durch die Pflanze verbessern, was insbesondere auf bisher wärmelimitierten Standorten bzw. während kühler Witterungsperioden als positiv zu bewerten ist. Mit zunehmender Austrocknung des Bodens und insbesondere bei Ausbildung von Trockenrissen wird zum einen die mikrobielle Nährstoffnachlieferung aus der organischen Substanz verringert und zum anderen die Pflanzenwurzeln unmittelbar negativ beeinflusst. Nur bei ehemals vernässten Böden ist dieser Effekt als positiv zu bewerten.

Die Wasserversorgung für landwirtschaftliche Kulturen dürfte zukünftig besonders kritisch in den Regionen werden, deren Böden über eine geringe Wasserspeicherkapazität verfügen. Dazu gehören z.B. grundwasserferne Sandböden bzw. Regionen, die bereits heute unter Wasserknappheit leiden, wie v.a. im Nordosten – z.B. in Teilen Brandenburgs oder der Magdeburger Börde – aber auch Teilen Südwestdeutschlands, wie z.B. im Oberrheingraben. Verschärft wird die Situation regional durch die Veränderung der Schneeschmelze im Frühjahr und den Rückgang der Gletscher in den Alpen, was das Wasserdargebot der Flüsse beeinträchtigt.

Umgekehrt lassen zunehmende Winterniederschläge eine höhere Vernässungsgefahr mit entsprechenden Einschränkungen für die Bodenbearbeitung bzw. den Weidebetrieb erwarten. Auch muss zukünftig wahrscheinlich verstärkt mit Hochwässern – v.a. im Winter und Frühjahr – und damit Überflutung von landwirtschaftlichen Flächen und Staunässe gerechnet werden. Bei wassergesättigtem Boden kommen aerobe Prozesse zum Erliegen, während anaerobe Prozesse zunehmen. Das gleiche gilt für Starkregenereignisse. Wird die Infiltrationskapazität des Bodens überschritten, besteht zudem eine zunehmende Erosions- und Hochwassergefahr.

Auswirkungen auf Pflanzenkrankheiten, Schädlinge und Unkräuter

Das Ausmaß des Auftretens von Pflanzenkrankheiten wird stark von Klimafaktoren beeinflusst, da diese sowohl die Anfälligkeit der Wirtspflanze als auch Wachstum sowie Überdauerungs- und Ausbreitungsvermögen der Schaderreger bestimmen (Abb. 5). Alle Agrarsektoren (Ackerbau, Grünland, Gartenbau) 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 sich verändernden Klima ergeben.

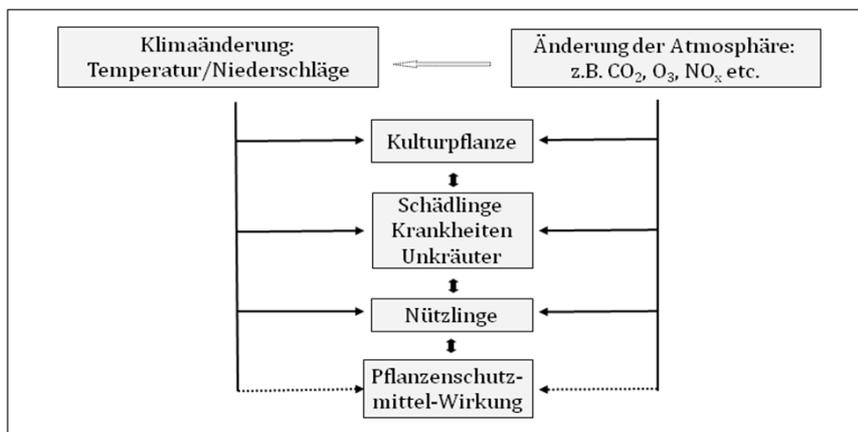
Änderungen chemischer Klimafaktoren (erhöhte Konzentrationen von CO₂, O₃) wirken direkt auf die pflanzliche Qualität und beeinflussen damit ebenfalls die Empfindlichkeit gegenüber Schaderregern bzw. Insekten. Die durch hohe CO₂-Konzentrationen verursachte Reduktion der Blattstickstoffgehalte (s.o.) bei gleichzeitiger Zunahme löslicher Kohlenhydrate resultierte in experimentellen Studien in einem verstärkten Konsum von Blattmaterial durch herbivore Insekten. Saugende Insekten sollen dadurch dagegen eher behindert werden, da hohe CO₂-Konzentrationen die Blattmorphologie („dickere“ Blätter) verändern. Die unterschiedliche Reaktion von C₃ und C₄-Pflanzen auf erhöhte CO₂-Konzentrationen könnte zu veränderten Verhältnissen zwischen Nutzpflanzen und Unkräutern führen. C₃-Unkräuter in C₄-Beständen (Mais) werden von der CO₂-Düngung relativ mehr profitieren, d.h. es wären negative Effekte denkbar. Steigende atmosphärische CO₂-Konzentrationen sollen zudem bei einigen Unkräutern die Pollenproduktion und damit das Risiko allergischer Reaktionen erhöhen.

Die allgemeine Erwärmung begünstigt grundsätzlich eingewanderte oder eingeschleppte Organismen aus mediterranen und subtropischen Gebieten. Mittlerweile gibt es Beobachtungen, die auf eine Zunahme der Bedeutung thermophiler Schad-

organismen in Deutschland schließen lassen. Tierische Schaderreger und hier insbesondere Insekten, finden durch mildere Wintertemperaturen günstigere Bedingungen vor, da die Erwärmung eine längere Entwicklungsaison bedingt und den Organismen (z.B. Maiszünsler, Kartoffelkäfer) die Entwicklung mehrerer Generationen ermöglicht. Für Blattläuse und Zikaden bedeuten die Verlängerung der Vegetationsperiode im Herbst und das frühere

als Verursacher der Partiellen Taubährigkeit (= Ährenfusariose) haben, konnte durch die globale Temperaturerhöhung eine Änderung im Artenspektrum festgestellt werden, d.h. es wurden im norddeutschen Raum eine Art (*Fusarium graminearum*) nachgewiesen, die früher nur in Süddeutschland, Österreich, Ungarn oder Italien von Bedeutung war. Trockenere, heißere Sommer werden aber auch die Infektionsgefahr für bestimmte Pilzkrankheiten

Abbildung 5: Auswirkungen von Änderungen einzelner Klimaelemente auf die Wechselbeziehungen zwischen Pflanzen, Schadorganismen und Antagonisten (nach Jahn et al. 1995, verändert)



Wachstum im Frühjahr, dass sie Winterkulturen (z.B. Raps und Getreide) länger direkt schädigen bzw. länger Pflanzenviren übertragen können.

Eine Zunahme verschiedener Wärme liebender Schadorganismen wird auch im Garten- und Weinbau beobachtet. Es kann vermutet werden, dass Schäden durch diese Organismen weiter zunehmen. Grundsätzlich wird also die Überlebensrate tierischer Schädlinge steigen, was größere Populationen im Frühjahr und höhere Schäden an den Wirtspflanzen während der Vegetationsperiode zur Folge hätte.

Pathogene Pilze werden durch ebenfalls durch höhere Temperaturen beeinflusst. Im Getreideanbau (Weizen) wird parallel zu der Erwärmung seit einiger Zeit ein verstärktes Auftreten des Blattfleckenenerregers (*Drechslera tritici-repentis*) festgestellt, der Mitte der 1990iger Jahre vorwiegend in Süddeutschland und Österreich vorkam. Bei *Fusarium*-Arten, die hohe Bedeutung

tendenziell reduzieren, da diese eher unter feuchtwarmen Bedingungen von Bedeutung sind.

Das Wachstum von Unkräutern wird ebenso wie das landwirtschaftlicher Kulturen durch veränderte Klimabedingungen beeinflusst. In Deutschland ist z.B. bereits eine Zunahme Wärme liebender Ackerunkräuter zu beobachten. In Öster-

reich ist die wegen ihres allergenen Potentials gefürchtete, wärmeliebende beifußblättrige Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia* L.) bereits das Hauptunkraut in Mais und anderen Hackfrüchten. Durch die weiter steigenden Temperaturen und längere Vegetationsperioden können sich bisher wärmelimitierte Arten weiter ausbreiten. Dies gilt z.B. für viele Samenunkräuter und für C4-Pflanzen und damit auch Unkräuter, die besser an heiße und trockene Bedingungen angepasst sind. Zunehmende Trockenheit beeinträchtigt zwar alle Pflanzen im Agrarökosystem, insbesondere perennierende Wurzelunkräuter, die sich mittels ihres Wurzelsystems zusätzliche Wasserressourcen erschließen, könnten über diese Wachstumsstrategie relative Vorteile erlangen und dadurch problematischer werden.

Die Bewertung der Fragen in diesem Bereich ist auch deshalb komplex und

schwierig, weil klimatische Veränderungen nicht nur auf die Schadorganismen selbst wirken, sondern ebenfalls auf ihre als „Nützlinge“ bezeichneten Antagonisten (Prädatoren und Parasitoide). In welcher Weise die Veränderungen der einzelnen Klimaelemente die ausbalancierten Wechselwirkungen zwischen Schad- und Nutzorganismen beeinträchtigen, ist zurzeit noch nicht zu beantworten.

Interaktionen und Rückkoppelungseffekte: CO₂, Temperatur, Niederschlag

In einem zukünftigen Klima werden Kulturpflanzen, Böden und Pflanzenpathogene gleichzeitig einer erhöhten CO₂-Konzentration, veränderten Temperaturverhältnissen und veränderten Niederschlagsregimen ausgesetzt sein (vgl. Abb. 2). Wie diese sich ändernden Klimaelemente zusammenwirken bzw. interagieren werden und welche Rückkoppelungen zwischen diesen Faktoren auftreten können, ist zurzeit noch unvollständig verstanden. Ein Beispiel soll dies erläutern.

In experimentellen Studien, in denen die gleichzeitige Wirkung einer erhöhten Durchschnittstemperatur und einer erhöhten CO₂-Konzentration untersucht wurden, wurden die o.g. negativen Temperatureffekte durch den positiven CO₂-Effekt z.T. kompensiert. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass die Reduktion der Blatt- und Bestandstranspiration durch mehr CO₂ in der Atmosphäre eine deutliche Erhöhung der Wassernutzungseffizienz zur Folge haben kann. Durch die Verringerung des latenten Wärmestroms aufgrund einer durch mehr CO₂ verminderten Transpiration kann gleichzeitig eine Temperaturzunahme (ca. +1°C) der Blatt- und Bestandesoberflächen auftreten. Durch die positive Rückkoppelung auf die Wassernutzungseffizienz könnte ein zukünftiger Rückgang der Sommerniederschläge ganz oder teilweise kompensiert werden. Dagegen könnte die physiologische Rückkoppelung mit dem latenten Wärmestrom die Wirkung einer klimatischen Temperaturerhöhung weiter verstärken. Ob die CO₂-

Wirkung auf den pflanzlichen Wasserhaushalt in einem zukünftig wärmeren Klima Probleme mit Bodentrockenheit bzw. Trockenstress abmildert, ist derzeit noch ungewiss.

Wird also bei einem Temperaturanstieg zunehmend auch die Wasserversorgung zum limitierenden Faktor, könnte der „CO₂-Düngeeffekt“ eine entscheidende Rolle für das Ergebnis der Wechselwirkungen spielen. In vielen entsprechenden Pflanzenwachstums- bzw. Ertragsmodellen (s.u.) fallen negative Ertragseffekte bei Getreide, die allein aufgrund erhöhter Temperaturen (und schlechterer Wasserversorgung) berechnet werden, wesentlich geringer aus bzw. kehren sich in positive Wirkungen um, wenn der CO₂-Düngeeffekt in die Bewertung mit einbezogen wird. Dies wiederum hängt davon ab, wie hoch die CO₂-bedingten Ertragszunahmen angesetzt werden. Auch für die Bewertung der Folgen einer zunehmenden Klimavariabilität bzw. der Zunahme von Extremereignissen muss berücksichtigt werden, dass diese Szenarien in einer Atmosphäre wirksam werden, in der allen Pflanzen grundsätzlich mehr CO₂ zur Verfügung steht. Es konnte z.B. gezeigt werden, dass die Hitzetoleranz von Kulturpflanzen unter hohen CO₂-Konzentrationen höher ist als unter den heutigen CO₂-Bedingungen.

Neben den Wissenslücken zu den Interaktionen der verschiedenen Klimaelemente selbst ist wenig darüber bekannt, in welcher Weise wiederum weitere Faktoren wie das landwirtschaftliche Management selbst (Düngung, Bodenbearbeitung, Bewässerung; Sortenwahl) diese Zusammenhänge beeinflussen. Nicht eindeutig geklärt ist z.B., ob der positive (relative) Effekt erhöhter CO₂-Konzentrationen bei niedriger Stickstoffversorgung der Pflanzen unterbleibt.

Auswirkungen des Klimawandels auf die Agrarproduktion in Deutschland

Nationale Nachfrage, EU-Agrarpolitik, globaler Agrarhandel, Markt- und Anbau-

bedingungen, Infrastruktur bzw. Marktnähe, Standortansprüche der einzelnen Kulturen und naturräumliche sowie klimatische Gegebenheiten bestimmen die Agrarproduktion auf der regionalen Ebene.

Während z.B. fruchtbare Böden im oberen Rheintal, entlang der lößreichen Börden in der Mitte Deutschlands und in den jungen Marschen an der Küste angetroffen werden, limitieren im Norden bzw. in höheren Lagen häufig geringe Temperatursummen und

v.a. im Nordosten mangelnder Niederschlag bzw. limitierte Wasserversorgung die Ertragsleistung bzw. die Anbaueignung landwirtschaftlicher Kulturen. Vor dem Hintergrund dieser Randbedingungen und der zu erwartenden regional unterschiedlichen Klimaveränderungen könnten die Anbauregionen in Deutschland unterschiedlich betroffen sein. Regionale Ertragsstudien zum Klimaimpakt liegen für einzelne Bundesländer bzw. Naturräume vor. Für die Agrarproduktion in Deutschland insgesamt einschließlich der sozioökonomischen Implikationen ist eine Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels noch nicht erfolgt.

Für die regionalen Klimaimpaktstudien wurden die o.g. regionalisierten Klimamodelle eingesetzt und mit Pflanzenwachstums- bzw. Agroökosystemmodellen verknüpft, mit deren Hilfe Aussagen über mögliche biophysikalische Auswirkungen der Veränderungen einzelner Klimaelemente auf Pflanzen und Böden etc. möglich sind. Die Vergleichbarkeit der verschiedenen (für Deutschland und auch für andere Länder vorliegenden) Klimaimpaktstudien ist nicht immer gegeben, u.a. weil unterschiedliche Modellannahmen vorgegeben wurden. Dies betrifft z.B. das jeweils zugrunde gelegte Emissionsszenarium, die

(Nicht)Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffektes sowie die Beschränkung auf spezielle Kulturpflanzenarten etc. Mögliche indirekte Wachstums- oder Ertragseffekte, z.B. über eine durch Klimaveränderungen

Tabelle 5: Relative Ertragsänderungen von Winterweizen in einzelnen Bundesländern bzw. Naturräumen in Deutschland ermittelt aus verschiedenen regionalen Klimaimpaktstudien mittels Modellberechnungen ohne Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffektes sowie (in Klammern) mit CO₂ Effekt

Bundesland / Naturraum	Ertragsänderung [%]	IPCC-SRES-Szenarium	Zeithorizont
Baden Württemberg	-14	A1	2050
Hessen	-10	B2	2041-2050
Brandenburg	-17 (-10)	A1B	2055
Märkisch-Oderland	-5 (+0,5)	A1B	2055
Elbeinzugsgebiet	-7,5	A1, B2	2020
Nordrhein-Westfalen (verschiedene Regionen)	bis -5 (+10 bis > +20) bis -7 (+5 bis > +15)	A1B B1	2050

veränderte phytosanitäre Situation oder über die Auswirkungen von Anpassungsmaßnahmen der Landwirtschaft wurden ebenfalls meist nicht berücksichtigt. Zudem muss bei der Interpretation der Ergebnisse die jeweilige Annahme zur Intensität der Klimaveränderung sorgfältig beachtet werden. Betrachtet wurden darüber hinaus bisher grundsätzlich nur Veränderungen mittlerer Klimawerte.

In Tab. 5 sind Beispielergebnisse derartiger Klimafolgenuntersuchungen nur für die Hauptkultur Weizen zusammengefasst. Die Ertragssimulation bis ca. 2050 zeigt Ertragsveränderungen durch den Klimawandel zwischen - 5% bis -17% bei Nichtberücksichtigung des CO₂-Düngeeffektes. Hohe Ertragseinbußen wurden für das Bundesland Brandenburg berechnet. Die jüngst erschienene Studie für Nordrhein-Westfalen zeigt relativ geringe Ertragsverluste für Weizen, sofern der CO₂-Düngeeffekt unberücksichtigt bleibt. Unter Einbeziehung des positiven CO₂- Effektes wurden dagegen in allen Teilregionen unter allen Klimaszenarien deutliche positive Ertragsveränderungen berechnet.

Maiserträge, die in einigen der in Tab. 5 gelisteten Studien (Elbeinzugsgebiet, Hessen, Nordrhein-Westfalen) ebenfalls betrachtet wurden, nahmen ohne Berück-

sichtigung des CO₂-Effektes allein aufgrund höherer Temperaturen und verändertem Niederschlag überwiegend geringfügig und bei Berücksichtigung des CO₂-Effektes um einige Prozent (+5% bis +9%) zu.

Eine weitere Studie hat die Ertragsentwicklung von Ackerflächen in Brandenburg, Thüringen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern unter dem Einfluss von Klimaveränderungen bis ca. 2050 (mittlere Temperaturzunahme ca. 2,8°C, zunehmende Sommertrockenheit, zunehmende Winterniederschläge) berechnet. Danach nehmen die Erträge von Winterweizen unter Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffektes zwischen 0% (BB) bis 11% (MV; SA) zu. Ohne Betrachtung des CO₂-Effektes liegen die Ertragsveränderungen zwischen +4% (MV) bis -15% (BB). Bei Silomais betragen die Ertragsveränderungen ohne CO₂-Effekt +5% (S) bis -4% (SA), mit CO₂-Effekt -1% (S) bis -20% (SA). Für die Grünlandproduktivität in Hessen wurde im Rahmen einer Klimafolgenabschätzung eine Zunahme von ca. 10%, für den Landkreis Märkisch-Oderland ein Verlust von ca. 15% jeweils gegenüber der heutigen Klimasituation errechnet.

Unter der realistischen Annahme, dass sich der CO₂-Düngeeffekt in Zukunft bemerkbar machen wird, zeigen die o.g. Beispiele, dass für den betrachteten Zeithorizont keine gravierend negativen Effekte des Klimawandels auf die Pflanzenproduktion zu erwarten sind, sondern dass vielmehr mit eher positiven Wachstumseffekten zu rechnen ist. Diese Einschätzung berücksichtigt nicht die Ertragsrisiken, die sich aus einer Zunahme von Klimaextremereignissen bzw. der Variabilität des Klimas insgesamt ergeben können.

Anpassung

Die Entwicklung und Anwendung von Anpassungsmaßnahmen entscheidet mit darüber, welche tatsächlichen Konsequenzen die zukünftige Klimaveränderung für die Agrarproduktion haben wird (Vulnera-

bilität). Für die Ableitung von Anpassungen müssen grundsätzlich die verschiedenen Ebenen der landwirtschaftlichen Produktion von der Auswahl der einzelnen Kulturpflanze bis hin zum gesamtbetrieblichen Management sowie vor- und nachgelagerte Produktionszweige und der internationale Agrarhandel betrachtet werden. An Veränderungen mittlerer Klimawerte kann sich die einheimische Landwirtschaft fortlaufend mit kurz- bis mittelfristigen Maßnahmen anpassen. Während diese Anpassungen selbständig (und mehr oder weniger kostenneutral) von den Landwirten durchgeführt werden können (autonome Anpassung), benötigen längerfristig notwendige Maßnahmen gezielte Vorgaben seitens Wissenschaft, Politik und Verwaltung (geplante Anpassung). Anpassungsmaßnahmen an die zunehmende Klimavariabilität bzw. an die Zunahme extremer Ereignisse sind weit schwieriger zu planen und zu realisieren. Anpassungsmaßnahmen werden im vorliegenden Beitrag stichwortartig nur für die Bereiche Pflanzenbau und Boden angesprochen.

Autonome und geplante Möglichkeiten, sich an klimatische Änderungen anzupassen und so klimabedingte Ertrags- und Qualitätseinbußen von Kulturpflanzen zu reduzieren, aber auch um sich neu eröffnende Potentiale möglichst weitgehend zu nutzen, sind vielfältig und lassen sich unter verschiedenen Aspekten zusammenfassen.

➤ ***Anbaueignung, Wachstum, Produktivität und Gesundheit von Kulturpflanzen***

- Änderung von Aussatterminen (im Herbst bzw. Frühjahr) und von Saatedichten und Reihenabstand
- Auswahl geeigneter Arten (z.B. mit höherer Wassernutzungseffizienz) und Sorten (höhere generelle Trocken-, Hitze- bzw. Klimatoleranz) sowie stärkere Nutzung von Arten/Sorten mit „escape Strategien“ (z.B. Vermeidung von Trockenphasen durch frühe Entwicklung)

- Anpassung von Fruchtfolgen durch Anbau von anderen Kulturen bzw. Sorten (Mischung von C3/C4 Pflanzen)
 - generell stärkere Diversifizierung von Fruchtfolgen zur Risikominimierung und zur Stärkung der Klimaplastizität des Anbaus
 - Optimierung von Düngestrategien zur max. Nutzung des positiven CO₂-Effektes und zur Sicherstellung von Qualitätseigenschaften (z.B. unter Hitzestress)
 - Änderung des Pflanzenschutzmanagements z.B. aufgrund veränderter Entwicklungsverläufe der Pflanzen und höherem Trockenstresstoleranz sowie auf der Basis fortlaufend neuer Fachinformationen zur veränderten Relevanz bekannter und zum Auftreten neuer Schaderreger
 - Verbesserung der Agrowettervorhersage.
- **Verfügbarkeit und Nutzungsmöglichkeiten von Wasserressourcen sowie Schonung biotischer und abiotischer Bodenressourcen**
- Optimierung der landwirtschaftlichen Beregnung durch technische Maßnahmen (z.B. Präzisionsbewässerung) und durch Verbesserung der Steuerung des Bewässerungseinsatzes
 - Anlage von Wasserreservoirs in trockenheitsgefährdeten Regionen
 - Mehrfachnutzung von Wasser (z.B. Rückhalt von Oberflächenabfluss und Brauchwasser)
 - Ausbau von Entwässerungssystemen (Drainage) zum Schutz gegen Extremniederschläge in gefährdeten Regionen
 - Optimierung von Techniken zur Konservierung der Bodenfeuchte (z.B. konservierende Bodenbearbeitung; Minimalbodenbearbeitung, Mulchsaat)
 - Förderung von Maßnahmen zum Erosionsschutz, zur Vermeidung von Bodenverdichtungen sowie zur Förderung
- der org. Bodensubstanz durch Änderungen der Bodenbearbeitung
- Förderung und Einsatz von natürlichen Bodenverbesserern
 - Änderungen der Bodenbearbeitung (u.a. gezielter Humusaufbau) zur Verbesserung der Wasserregulation.
- **Züchtung, genetische Ressourcen, Agrobiodiversität**
- generelle Weiterentwicklung robuster und unter wechselnden Witterungsbedingungen ertragsstabiler Kulturen
 - züchterische Verbesserung der Hitze- und Trockenstresstoleranz traditioneller Kulturpflanzen
 - Bereitstellung von Saatgut neuer, Wärme liebender Pflanzensorten
 - züchterische Anpassung der Entwicklungsraten von Pflanzen an die geänderten Temperatur- und Niederschlagsbedingungen
 - die Erhöhung des Wachstums- und Ertragspotentials zur optimalen Ausnutzung des CO₂-Düngeeffektes
 - Sicherstellung einer hohen stofflichen Qualität unter veränderten Wuchsbedingungen durch Züchtung
 - Resistenzzüchtung zur Abwehr von neuen, durch den Klimawandel auftretenden Schädlingen und Krankheiten
 - Prüfung der Klimasensitivität traditionell genutzter und alter Sorten und Förderung des Anbaus
 - ev. Koppelung von Arten- und Biotopschutzprogrammen mit Maßnahmen zum Schutz (pflanzen)genetischer Ressourcen
 - grundsätzliche Förderung von Kulturarten- bzw. Nutzungsvielfalt.
- Klimawandel: Auswirkungen und Anpassung im ökologischen Landbau**
- Ob und inwieweit der ökologische Landbau im Vergleich zu konventionellen Formen der Landwirtschaft empfindlicher

oder unempfindlicher gegenüber den geschilderten Klimaveränderungen ist und welche relativen Vorteile die eine oder die andere Landwirtschaftsform für die Anpassung an den Klimawandel hat, ist nicht pauschal zu beantworten. Sowohl der jeweilige regionale klimatische Kontext als auch die jeweilige Betriebsform spielen hier eine Rolle. Ökologische Bewirtschaftungsformen basieren wesentlich stärker als im konventionellen Bereich auf den natürlichen Regelungsmechanismen der Agrarökosysteme. Daraus allein lässt sich keine grundsätzlich höhere oder geringere Empfindlichkeit gegenüber dem Klimawandel im Vergleich zum konventionellen Bereich ableiten. Wissenschaftlich fundierte Systemvergleiche dazu unter dem Aspekt des Klimawandels liegen nicht vor.

Die im ökologischen Landbau übliche schonende, konservierende (Humus anreichernde) Bodenbearbeitung mit den positiven Folgen für die Bodenfruchtbarkeit insgesamt und insbesondere für die physikalische Bodenstruktur (Porosität, Wasserhaltevermögen, Verdunstungsminimierung) lassen eine höhere Resilienz gegenüber Klimaextremen (Starkregen) bzw. eine geringere Empfindlichkeit speziell gegenüber Trockenheit vermuten. Letzteres wurde in einigen Untersuchungen gezeigt, in denen unter Trockenheitsbedingungen in organisch bewirtschafteten Systemen höhere Erträge erzielt wurden als unter konventioneller Bewirtschaftung.

Die durch den Verzicht auf mineralische Stickstoffdüngung grundsätzliche Stickstofflimitierung im ökologischen Landbau könnte sich insbesondere bei weiter zunehmender Trockenheit speziell auf leichten Böden verschärfen. Wassermangel beeinträchtigt die mikrobielle Stickstoffmineralisation und speziell im Winter können mildere Temperaturen und höhere Niederschläge die Nitratauswaschung erhöhen. Dies gilt zwar auch im konventionellen Bereich, kann hier aber kurzfristig durch eine mineralische Düngung ausgeglichen werden. Denkbar ist daher, dass sich Ertrags- und Qualitätsabstände (Kornprotein) zwischen konventioneller und ökologischer

Erzeugung vergrößern.

Inwieweit der weitgehende Verzicht auf herkömmliche Pflanzenschutzmittel im ökologischen Landbau zu einer stärkeren relativen Empfindlichkeit gegenüber dem Klimawandel im Vergleich zum konventionellen Bereich führt, ist noch schwieriger zu beurteilen. Klimabedingten Veränderungen der Populationsentwicklungen und -dichten von bisher unproblematischen bzw. neuen Pflanzenkrankheiten, Schadinsekten und Unkräutern kann nicht mit den im konventionellen Bereich kurzfristig einsetzbaren Pflanzenschutzmitteln begegnet werden.

Die Potentiale des ökologischen Landbaus zur Anpassung an den Klimawandel gleichen in vielen Bereichen denen der konventionellen Landbewirtschaftung. Die im ökologischen Landbau vielfältigere Nutzung verschiedener Kulturpflanzen in weiteren Fruchtfolgen sowie der Einsatz von Sorten und Rassen mit spezieller Standortteignung tragen grundsätzlich zur Diversifizierung der Pflanzenproduktion bei. Diese Wirtschaftsweise mindert damit witterungsbedingte Totalausfälle in besonderer Weise und trägt zur Risikostreuung bei. Andererseits verlangt eine zunehmende Unvorhersagbarkeit von Witterungsverläufen aufgrund zunehmender räumlicher und zeitlicher Klimavariabilität nach „Universal-Genotypen“ im Ackerbau, die mit hoher Ertragsstabilität Regionen unabhängig eingesetzt werden können. Dies widerspricht dem gewünschten Einsatz von an lokale Klimaverhältnisse angepassten „Landrassen“ im ökologischen Landbau. Die zunehmende Klimavariabilität verlangt dabei auch, dass festgelegte Fruchtfolgeabläufe im ökologischen Landbau hinterfragt werden und flexibler gehandhabt werden.

Fazit

Die Landwirtschaft in Deutschland sollte aufgrund der insgesamt geringen Vulnerabilität und der guten Ressourcenausstattung in der Lage sein, negative Auswirkungen der Klimaveränderungen - und hier vor allem der allmählichen Veränderungen

mittlerer Klimabedingungen - zu meistern sowie sich daraus eröffnende Chancen sogar zu nutzen. Entscheidend dafür wird sein, dass zur Verfügung stehende Anpassungsmaßnahmen genutzt und weiterentwickelt sowie neue Maßnahmen kontinuierlich entwickelt werden. Positive Wachstumseffekte für Pflanzen können sich ergeben u.a. aus einem moderaten mittleren Temperatur-Anstieg (ca. 2°C) mit längeren Vegetationsperioden bei gleichzeitiger Wirkung des CO₂-Düngeeffektes incl. einer besseren Wasserausnutzung. Durch die Erwärmung werden sich Möglichkeiten zum Anbau neuer Fruchtarten bzw. zur Etablierung neuer Fruchtfolgen eröffnen, die - bei gleichzeitigem Verlust von Anbaumöglichkeiten in zukünftigen "Ungunst-Regionen" (z.B. in Südeuropa) - insgesamt bessere Produktionsbedingungen schaffen könnten.

In einzelnen Regionen bzw. für bestimmte landwirtschaftliche Betriebszweige in Deutschlands sind in Zukunft Risiken aber nicht ausgeschlossen. Diese resultieren insbesondere aus dem zunehmenden Produktionsrisiko durch eine höhere Klimavariabilität und durch häufigere extreme Witterungsereignisse, langfristig (über 2011 hinaus) darüber hinaus auch aus negativen Effekten einer noch stärkeren Erwärmung (T > 3-4°C) mit Folgen für Pflanzen und Böden. Diese unterschiedlichen regionalen Auswirkungen der Klimaveränderungen könnten die gegenwärtigen Unterschiede in regionalen Produktionspotentialen in Deutschland und darüber hinaus vergrößern. Eine geringere oder höhere Empfindlichkeit des ökologischen Landbaus gegenüber konventionellen Formen der Landbewirtschaftung sowie eine relative Vorzüglichkeit einer der beiden Bewirtschaftungsformen bei der Anpassung an den Klimawandel kann nach derzeitigem Wissensstand nicht abgeleitet werden.

Literatur

Anmerkung:

Vor dem Hintergrund der enormen Fülle an Literatur zum Thema Klimawandel und Landwirtschaft ist im obigen Beitrag auf Detailzitate zu einzelnen Aussagen

verzichtet worden. Nachfolgend sind stattdessen einige aktuelle Buchpublikationen bzw. Übersichtsarbeiten aufgeführt, in denen sich weitergehende Informationen zu den einzelnen Textkapiteln finden.

- Ainsworth, E.A. and J.M. McGrath (2010) Direct effects of rising atmospheric carbon dioxide and ozone on crop yields. In: Lobell, D., Burke, M. (eds). Climate change and food security. Adapating agriculture to a warmer world. Advances in Global Change Research 37, Springer, 109-130.
- Battisti, D.S. and R.L. Naylor (2009) Historical Warnings of Future Food Insecurity with Unprecedented Seasonal Heat. Science 323: 240-244.
- Chakraborty, S., von Tiedemann, A. and P.S.Teng (2000) Climate change: potential impact on plant diseases. Environmental Pollution 108: 317-326.
- Dämmgen, U. and H.J.Weigel (1998) Trends in atmospheric composition (nutrients and pollutants) and their interaction with agroecosystems. In: Sustainable agriculture for food, energy and industry: strategies towards achievement. El Bassam, N., Behl, R., Prochnow, B., eds. (James & James), pp. 85-93. 267.
- Bender, J. and H.J.Weigel (2010) Changes in atmospheric chemistry and crop health: a review. Agriculture for Sustainable Development 31: 81-89.
- Bundesregierung (2008) Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Bundeskabinett. 17.12.2008. (<http://www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/42783.php>).
- Eitzinger, J., Kersebaum, K. and H. Formayer (2009) (Hrsg.) Landwirtschaft im Klimawandel. AgriMedia. ISBN 978-3-86037-1; 376 S.
- Fuhrer, J. (2003) Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. Agriculture Ecosystems and Environment 97: 1-20.
- Gomiero, T., Paoletti, M.G. and D.Pimentel (2008) Energy and environmental issues in organic and conventional agriculture. Critical Reviews in Plant Sciences 27: 239-254.
- IPCC (2007) Climate Change - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jaggard, K.W., Qi, A. and E.S. Ober (2010). Possible changes to arable crop yields by 2050. Philosophical Transactions of the Royal Society (B) 365: 2835-2851.
- Kirkham, M.B. (2011) (ed.) Elevated Carbon Dioxide. Impacts on Soil and Plant Water Relations. CRC Press, 399 S.

- Leakey, A.D.B., E.A. Ainsworth, C.J. Bernacchi, A. Rogers, S.P. Long, and D.R. Ort (2009) Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *Journal of Experimental Botany*. 60: 2859-2876.
- Long, S.P., Ainsworth, E.A., Leakey, A.D.B. and P.B. Morgan (2005) Global food insecurity. Treatment of major food crops with elevated carbon dioxide or ozone under large-scale fully open air conditions suggests recent models may have overestimated future yields. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 360: 2011-2020.
- Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kubler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briede, A., Chmielewski, F.M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, A., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatcza, K., Mage, F., Mestre, A., Nordli, O., Penuelas, J., Pirinen, P., Remisova, V., Scheffinger, H., Striz, M., Susnik, A., Van Vliet, A.J.H., Wielgolaski, F.E., Zach, S. and A. Züst (2006) European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12: 1969-1976.
- Morrison, J.I.L. and D.W. Lawlor (1999) Interactions between increasing CO₂ concentration and temperature on plant growth. *Plant Cell and Environment* 22: 659-682.
- Newton, P.C.D., Carran, R.A., Edwards, G.R. and P.A. Niklaus (2007) (Eds.) *Agroecosystems in a changing climate*. CRC, Taylor and Francis, Boca Raton, London, New York; 364 S.
- Niggli, U., Schmid, O., Stolze, M., Sanders, J., Schader, C., Fließbach, A., Mäder, P., Klocke, P., Wyss, G., Balmer, O., Pfiffner, L. and E. Wyss (2009) *Gesellschaftliche Leistungen der biologischen Landwirtschaft*. Forschungsinstitut für biologischen Landbau; www.fibl.org
- Porter, J.R. and M. Gawith (1999). Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *European Journal of Agronomy* 10: 23-36.
- Rapp, J. und C. Schönwiese (1996): *Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990*, Frankfurter geowissenschaftliche Arbeiten: Ser. B, Meteorologie und Geophysik; Bd. 5, Frankfurt am Main,
- Reddy, K.R. and H.F. Hodges (2000) (Eds.) *Climate Change and Global Crop Productivity*. CABI Wallingford; 292 S.
- Reynolds, M. (2010) *Climate Change & Crop Production*. CABI Wallingford; 292 S.
- Schaller, M. und H.J. Weigel (2007) *Analyse des Sachstandes zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung*. *Landbauforschung Völkenrode SH* 316: 247 Seiten
- Schönwiese, C.D. (2005) *Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von klimatologischen Extremereignissen*. UBA-Bericht, FKZ 2014/1254, Berlin.
- Taub, D.R., Miller, B. and H. Allen (2007) *Effects of elevated CO₂ on protein concentration of food crops: a meta-analysis*. *Global Change Biology* 14: 1-11.
- UBA (2007) *Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2*, Hrsg: A. Spekat, W. Enke und F. Kreienkamp, Umweltbundesamt, Dessau, 112 pp.
- Weigel, H.-J., R. Manderscheid, A. Fangmeier und P. Högy (2008): *Mehr Kohlendioxid in der Atmosphäre: Fluch oder Segen für die Landwirtschaft?*, in: Lozán, J.L./ Graßl, H./ Jendritzky, G./ Karbe, L./ Reise, K./ Maier, W.A. (Hrsg.): *Warnsignal Klima. Gesundheitsrisiken. Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen*. Hamburg, S. 273-277.